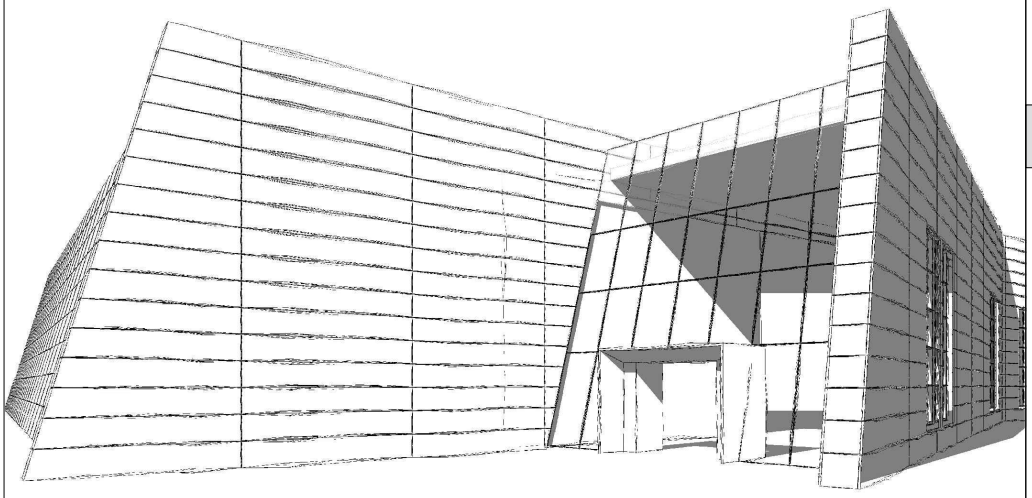
COMUNE DI PONTE SAN PIETRO (BG)



VERIFICA DI OTTEMPERANZA

OGGETTO

"Ottemperanza alle prescrizioni 1-10 del Decreto MASE VIA 0000592 del 06-10-2025 ai sensi dell'art. 28 del D.Lgs, 152/2006

Progetto del Polo Tecnologico Aruba Spa costituito da DataCenter che prevede l'installazione di gruppi elettrogeni di emergenza, alimentati a gasolio (potenza termica nominale totale pari a 297,375 MWt)".

5 - AMBIENTE IDRICO

5A

TITOLO

AGGIORNAMENTO DELLO STUDIO IDROGEOLOGICO PER LA VERIFICA DEGLI EFFETTI DEI PRELIEVI DI ACQUA DI FALDA

SCALA:	DATA:
-	18/02/2026

ENTE PREPOSTO

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

SOGGETTI COINVOLTI

Proponente

Aruba S.p.a.
Via S.Clemente n. 53
24036 Ponte S. Pietro (BG)

Progettisti

Alvea S.r.l.
Via Elia Lombardini 13
20143 Milano

febbraio 2026

AGGIORNAMENTO DELLO STUDIO IDROGEOLOGICO DELL'AREA ARUBA IN VALBREMBO - PONTE SAN PIETRO (BG) PER LA VERIFICA DEGLI EFFETTI DEI PRELIEVI DI ACQUA DI FALDA

Nata tecnica nell'ambito delle risposte di ottemperanza alle prescrizioni del Decreto del MASE – Procedura di VIA n. 10551

[25Milano04_25CTaP01/1]
Alvea S.r.l.

Redatto da
Ananda Davide Trapanese
Verificato da
Mauro Consonni
Approvato da
Dario Rigamonti

Sommario

1. PREMESSA 4

2. DESCRIZIONE DEI POZZI DI PRESA E RESA E MONITORAGGIO DELLE PORTATE E DEI LIVELLI NEL PERIODO 2021-2025 5

3. ATTIVITA' DI INDAGINE INTEGRATIVA 8

4. MODELLO CONCETTUALE IDROGEOLOGICO DELL'AREA 9

4.1. Inquadramento geologico e idrogeologico regionale 9

4.2. Assetto idrogeologico locale dell'area del campo pozzi 11

4.2.1. Piezometria 14

4.2.2. Prove su pozzi e conducibilità idraulica 17

5. MODELLO DI FLUSSO 18

5.1. Dominio e griglia di discretizzazione 19

5.2. Condizioni al contorno e parametri idrodinamici 21

5.3. Calibrazione e validazione 24

6. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEI POMPAGGI E DELLA REIMMISSIONE IN FALDA ALLE PORTATE DI PROGETTO 28

6.1. Effetti del pompaggio sui livelli piezometrici della falda 29

6.1.1. Scenario con portata media (600 l/s) 29

6.1.2. Scenario con portata massima (800 l/s) 32

6.2. VALUTAZIONE DELL'EVENTUALE INTERFERENZA CON LE OPERE DI PRESA IRRIGUE 35

7. CONCLUSIONI 38

ALLEGATI

Allegato 1: Esiti delle prove di pompaggio eseguite sui pozzi P2, P4, P5, P6 e P8

Allegato 2: Sezione idrogeologica

1. PREMESSA

Tethys S.r.l. ha ricevuto incarico da Alvea S.r.l. (di seguito Alvea) di predisporre il presente documento con lo scopo di aggiornare il modello matematico di flusso della falda idrica sotterranea, in ottemperanza alle prescrizioni del MASE al documento *'Progetto di ampliamento del polo tecnologico Aruba Spa costituito da Datacenter per la fornitura di servizi clouds come server e relativa installazione dei gruppi elettrogeni di emergenza, alimentati a gasolio, da realizzarsi in Comune di Ponte San Pietro (BG) in via San Clemente n.53'* relative ai potenziali impatti sulla falda acquifera e sulle opere di presa delle acque superficiali dei pozzi di pompaggio e reimmissione a servizio del sistema di scambiatori termici dei Datacenter Aruba ubicati nel comune di Ponte S. Pietro (BG).

L'aggiornamento del modello di flusso è stato effettuato a seguito della realizzazione degli ultimi pozzi perforati nel 2023 a seguito di autorizzazione (P5, P6, P7, P8), che ha consentito di disporre di un numero maggiore di punti per il monitoraggio dei livelli e delle caratteristiche idrodinamiche della falda acquifera. Ciò ha permesso una ricostruzione più dettagliata dall'andamento piezometrico locale, e l'esecuzione di prove in sito finalizzate all'affinamento delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero.

A tale scopo, in seguito all'ottenimento del decreto di PAUR, è stata eseguita un'apposita campagna di indagini integrative (campagne di misura piezometriche, prove di pompaggio sui pozzi) finalizzata a una definizione più accurata della struttura idrogeologica, delle proprietà idrodinamiche locali dell'acquifero (trasmissività e permeabilità) e delle interazioni tra la falda e le acque superficiali.

Sulla base delle nuove informazioni di carattere idrogeologico acquisite negli ultimi anni, è stato pertanto sviluppato il modello di flusso aggiornato, utilizzato per l'esecuzione di simulazioni modellistiche finalizzate all'approfondimento dei seguenti aspetti, oggetto delle prescrizioni del MASE:

- valutazione degli effetti piezometrici sulla falda acquifera del pompaggio presso il campo pozzi e della reimmissione in falda delle acque emunte alle portate medie e massime oggetto della concessione approvata con il decreto n. 5018 della Regione Lombardia del 13/4/2022, pari rispettivamente a 600 l/s e 800 l/s totali.
- valutazione di eventuali interferenze del sistema di pompaggio con le opere di presa del Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca, alla luce in particolare delle criticità idrogeologiche emerse nel 2022.

Nella relazione sono illustrati i risultati dei monitoraggi e delle indagini idrogeologiche integrative (Cap. 2 e 3), il conseguente affinamento del modello concettuale idrogeologico (Cap. 4), le caratteristiche del modello matematico di flusso della falda aggiornato sulla base

dei nuovi dati acquisiti (Cap. 5), nonché i risultati delle simulazioni predittive condotte con il sistema di pozzi in esercizio alle portate di progetto (Cap. 6).

2. DESCRIZIONE DEI POZZI DI PRESA E RESA E MONITORAGGIO DELLE PORTATE E DEI LIVELLI NEL PERIODO 2021-2025

Il sistema di pompaggio per l'approvvigionamento idrico degli scambiatori di calore a servizio dei datacenter è costituito da 8 pozzi, di cui 4 preesistenti (P1, P2, P3, P4 la cui realizzazione risale agli anni '60-'70) e 4 di nuova realizzazione (P5, P6, P7, P8 realizzati nel 2021 e messi in funzione a partire dal 2024). I pozzi sono ubicati nel territorio comunale di Valbrembo a circa 400 m a nord del Data Center, lungo un allineamento con direzione circa SW-NE in un'area pianeggiante presso la sponda sinistra del canale Legler (Derivazione del Brembo a uso idroeolettrico). Il fiume Brembo si trova a distanze comprese tra 130 e 250 m a ovest del campo pozzi. I pozzi hanno profondità variabili tra 14 e 21 m, con tratti filtrati a partire da 5-9 m da bocca pozzo. Le distanze di interasse tra un pozzo e l'altro variano da un minimo di circa 20 m (P2-P3) a un massimo di 130 m.

L'acqua in uscita dagli scambiatori termici viene reimmessa in falda mediante un sistema di pozzi di resa profondi, dotato di troppo pieno verso il Fiume Brembo tramite due punti di scarico (ST1 e ST2). Il sistema è costituito complessivamente da 27 pozzi di resa, ciascuno profondo 25 m, suddivisi in tre gruppi denominati A, B e C, ubicati nell'area dei data center a una distanza di circa 120 m dal fiume Brembo (Figura 1).

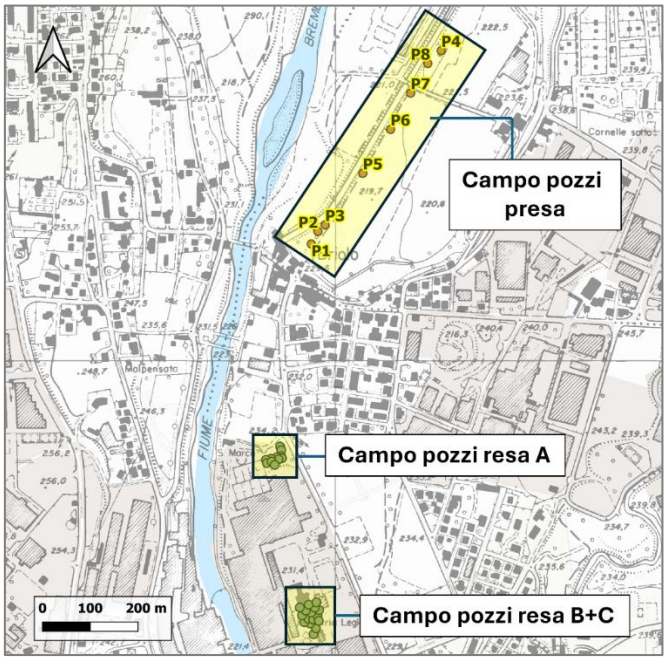


Figura 1 – ubicazione dei pozzi di pompaggio e dei pozzi di reimmissione.

L'attuale concessione per la derivazione di acque sotterranee autorizza, per l'intero sistema di pompaggio, una portata media pari a 600 l/s e una portata massima di 800 l/s, per un volume annuo complessivo di 18.888.000 m³. Di seguito si riporta una sintesi dei decreti di concessione rilasciati dalla Regione Lombardia nel periodo compreso tra il 2016 e il 2024.

1) Decreto n. 5417 della Regione Lombardia delL 10/06/2016 e Disciplinare del 27/6/2016: autorizzazione per derivazione d'acqua con 4 pozzi per una portata massima di 242 l/s e media di 111 l/s, per un valore annuo di 3 500 000 metri cubi.
2) Decreto n. 9517 del 12/7/2021: autorizzazione provvisoria all'esercizio della derivazione in variante alla concessione già rilasciata nel 2016 con aumento della portata media da 111 l/s a 221 l/s.
3) Decreto n. 5018 della Regione Lombardia del 13/4/2022 in cui viene adottata la determinazione conclusiva della Conferenza di Servizi decisoria che, nella seduta del 27 gennaio 2022 ha espresso parere positivo in merito al rilascio dei titoli abilitativi relativi alla concessione di derivazione di acque sotterranee da otto pozzi in Comune di Valbrembo, per una portata media complessiva di 600 l/s e massima di 800 l/s.

In Tabella 1 si riportano i volumi annui e le relative portate complessive emunte dal sistema nel periodo 2016-2024. Nel 2024 il volume annuo di esercizio è pari a 7166369 metri cubi, per una portata media del sistema di pompaggio di 227 l/s.

Tabella 1 – volume totale annuo e portata totale di esercizio dei pozzi di presa per l'alimentazione degli scambiatori termici nel periodo 2016-2024

Anno	Volume annuo [m³]	Portata [l/s]
2016	544505	17
2017	1103975	35
2018	1214326	39
2019	1686472	53
2020	2796352	89
2021	4030758	128
2022	4986807	158
2023	6670834	212
2024	7166369	227

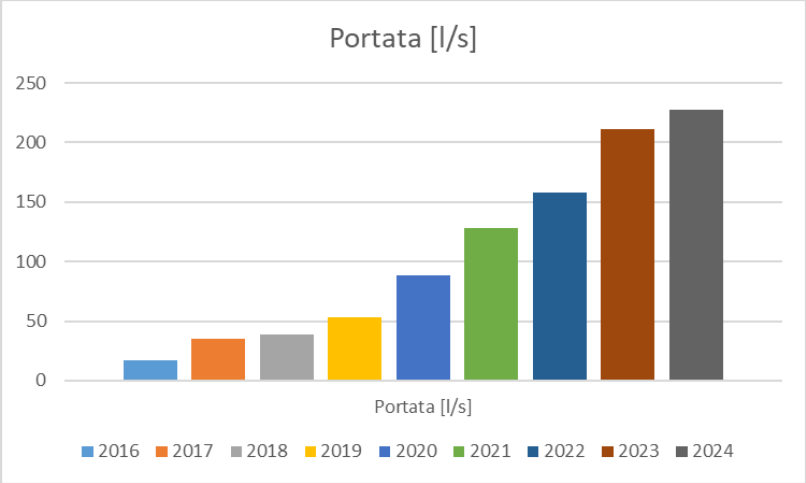


Figura 2 – andamento della portata media di esercizio del sistema di pozzi di presa nel periodo 2016-2024

L'andamento dei livelli piezometrici degli ultimi cinque anni, monitorato in continuo tramite i sensori installati nei pozzi, non mostra variazioni significative nel tempo, neppure in seguito all'aumento della portata annua complessivamente emunta, passata da circa 4 a 7 milioni di m^3/anno tra il 2021 e il 2024. Come evidenziato nel grafico in Figura 3, i livelli piezometrici risultano infatti sostanzialmente stabili, con un lieve trend di risalita, più marcato nel corso del 2024 evidenziando l'assenza di fenomeni di depauperamento della risorsa idrica sotterranea all'aumentare delle portate di emungimento. I valori minimi sono stati registrati nel 2022 e durante l'estate del 2023 in periodi particolarmente siccitosi; tali condizioni di minimo sono state assunte in via cautelativa come riferimento per le simulazioni modellistiche previsionali, condotte alle portate medie e massime di concessione descritte nel Capitolo 6.

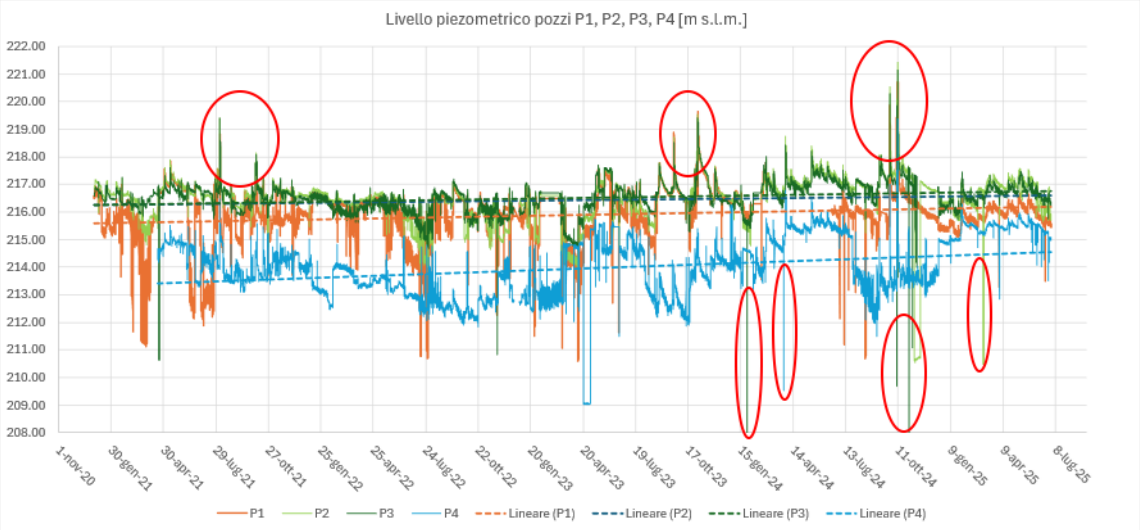


Figura 3 – andamento dei livelli piezometrici registrati in continuo dai sensori installati nei pozzi P1, P2, P3, P4 nel periodo 1 gennaio 2023 – 31 luglio 2025: si osserva la sostanziale stabilità dai livelli nel tempo, anche in seguito all'incremento

delle portate di emungimento avvenuto tra il 2021 e il 2024. I cerchi rossi indicano valori anomali dovuti a temporanee irregolarità nella registrazione dei sensori di livello.

3. ATTIVITA' DI INDAGINE INTEGRATIVA

Come premesso, al fine di ricostruire l'assetto idrogeologico con maggiore dettaglio ("modello concettuale idrogeologico") nell'area del campo pozzi è stata condotta nei mesi di dicembre 2022 e gennaio 2023 una fase di indagine integrativa che ha previsto sia la ricerca e la raccolta di dati e informazioni utili alla ricostruzione stratigrafica e idrogeologica, sia l'esecuzione di misure e prove in campo.

La realizzazione di 4 nuovi pozzi (P5, P6, P7, P8) ha reso infatti disponibile un maggior numero di punti di monitoraggio che ha consentito una ricostruzione più dettagliata dell'andamento piezometrico locale e la realizzazione di prove di pompaggio di lunga durata per l'affinamento delle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (trasmissività e permeabilità).

Nel dettaglio sono state svolte le seguenti attività, il dettaglio delle elaborazioni e dei risultati conseguiti sono riportati nel successivo Capitolo 4:

- Ricerca e acquisizione degli ulteriori dati utili per la ricostruzione di dettaglio della struttura idrogeologica del sottosuolo e la realizzazione del modello di flusso (stratigrafie di pozzi e sondaggi, dati piezometrici, livelli idrometrici del fiume Brembo, ecc) disponibili nei PGT comunali, sul Portale della Regione Lombardia, nella cartografia geologica ufficiale (CARG) o da altri studi geologici eseguiti nell'area.
- Battuta topografica del piano campagna e della testa pozzo dei pozzi e di alcuni punti di interesse nell'area (ponte sul canale Legler e sponda del fiume Brembo da utilizzare come riferimento per le misure dei livelli dei corsi d'acqua superficiali).
- Esecuzione di una campagna piezometrica statica (con pozzi spenti) il giorno 14/12/2022 sugli 8 pozzi del campo pozzi Aruba e su 3 pozzi esterni; contestualmente sono state prese misure del livello del fiume Brembo e del canale Legler in diversi punti.
- Esecuzione di prove di pompaggio di lunga durata a portata costante sui pozzi di nuova realizzazione P5, P6 e P8 e sui pozzi preesistenti P2 e P4, finalizzate alla definizione di dettaglio delle caratteristiche idrodinamiche (trasmissività, permeabilità) dell'acquifero. Le prove sono state eseguite tra l'11 gennaio e il 3 febbraio 2023 attivando il pompaggio sul pozzo ad una portata costante, determinata sulla base dei risultati delle prove a gradini, per un periodo di 24-36 ore, monitorando gli eventuali abbassamenti nei due pozzi adiacenti in continuo tramite datalogger con

intervallo di acquisizione di 30 secondi. I risultati sono riportati nel Par. 4.2.2 e in Allegato 1.

- Analisi ed elaborazione dei dati (portate, livelli piezometrici) acquisiti in continuo dai sensori posizionati sui pozzi

L'elaborazione dei dati ottenuti ha permesso di ricostruire il modello concettuale idrogeologico dell'area, acquisendo in particolare nuove informazioni di dettaglio sull'area del campo pozzi per quanto riguarda le caratteristiche di permeabilità e produttività dell'acquifero, sulle direzioni di flusso locali della falda e sui rapporti idraulici esistenti tra la falda e il fiume Brembo.

Il modello concettuale idrogeologico è poi confluito nel modello matematico di flusso, fisicamente basato su di esso, utilizzato per la simulazione degli scenari predittivi di esercizio dei pozzi alle portate di progetto, come descritto nei capitoli 5 e 6.

4. MODELLO CONCETTUALE IDROGEOLOGICO DELL'AREA

4.1. Inquadramento geologico e idrogeologico regionale

Il campo pozzi è ubicato in un'area di alta pianura a ridosso della fascia pedemontana, caratterizzata dal punto di vista geologico-stratigrafico della presenza in affioramento di depositi fluvioglaciali e alluvionali terrazzati di età compresa tra l'Olocene e il Pleistocene medio.

Questo settore è stato caratterizzato nel Pleistocene da una neotettonica blanda, che ha portato a un lento sollevamento di questa porzione di territorio rispetto a quelle poste in prossimità del Po e di quelle ubicate ad Est del Fiume Oglio. Questo sollevamento ha preservato una rilevante porzione della pianura in esame dalla copertura di depositi dei corsi d'acqua che hanno inciso l'area in tempi successivi (Olocene); questi depositi più recenti rimangono in tal modo confinati in spazi relativamente ristretti disposti in fasce che si allargano progressivamente proseguendo verso Sud, saldandosi insieme a formare l'esteso deposito di alluvioni prevalentemente ghiaioso-sabbiose della pianura lombarda centrale.

I lembi dell'antica pianura costituiti prevalentemente da depositi fluvioglaciali di età compresa tra il Pleistocene Inferiore e Superiore, risultano quindi rilevati di alcuni metri (sono detti per questo motivo "terrazzi") rispetto ai depositi più recenti, e i loro collegamenti con la piana sottostante sono costituiti da scarpate più o meno incise ed erose che ne consentono una delimitazione ragionevolmente precisa.

Più in dettaglio, i pozzi di presa ricadono all'interno dei depositi alluvionali più recenti del fiume Brembo (Sintema del Po/Unità Postglaciali – POI), in un'area pianeggiante con una quota media di circa 220 m s.l.m. Tali depositi sono costituiti da ghiaie e ciottoli in matrice

sabbiosa, con alterazione scarsa o nulla e ridotta frazione limoso-argillosa, che gli conferiscono un'alta permeabilità. Allontanandosi dal fiume Brembo affiorano depositi fluvioglaciali via via più antichi e caratterizzati da maggiore alterazione e presenza di matrice limoso-argillosa, che costituiscono i terrazzi a quote più elevate e includono le unità di Lenna (LE), dove sono ubicati i pozzi di resa, Ponte S. Pietro (BPO) (ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa datate Plesistocene sup.) e l'unità di Brembate (BEB) (ghiaie in abbondante matrice argillosa datata Pleistocene medio).

Alla base della successione fluvioglaciale del Pleistocene-Medio superiore sopra descritta, sono presenti i conglomerati di età Plesitocenico-inferiore/Pliocenica superiore del Ceppo del Brembo (BRM) che affiorano localmente in corrispondenza degli orli erosivi dei terrazzi in destra idrografica del Brembo; i conglomerati poggiano sul substrato roccioso di età cretacica costituito da alternanze di arenarie, argilliti e calcari (Flysch di Bergamo).

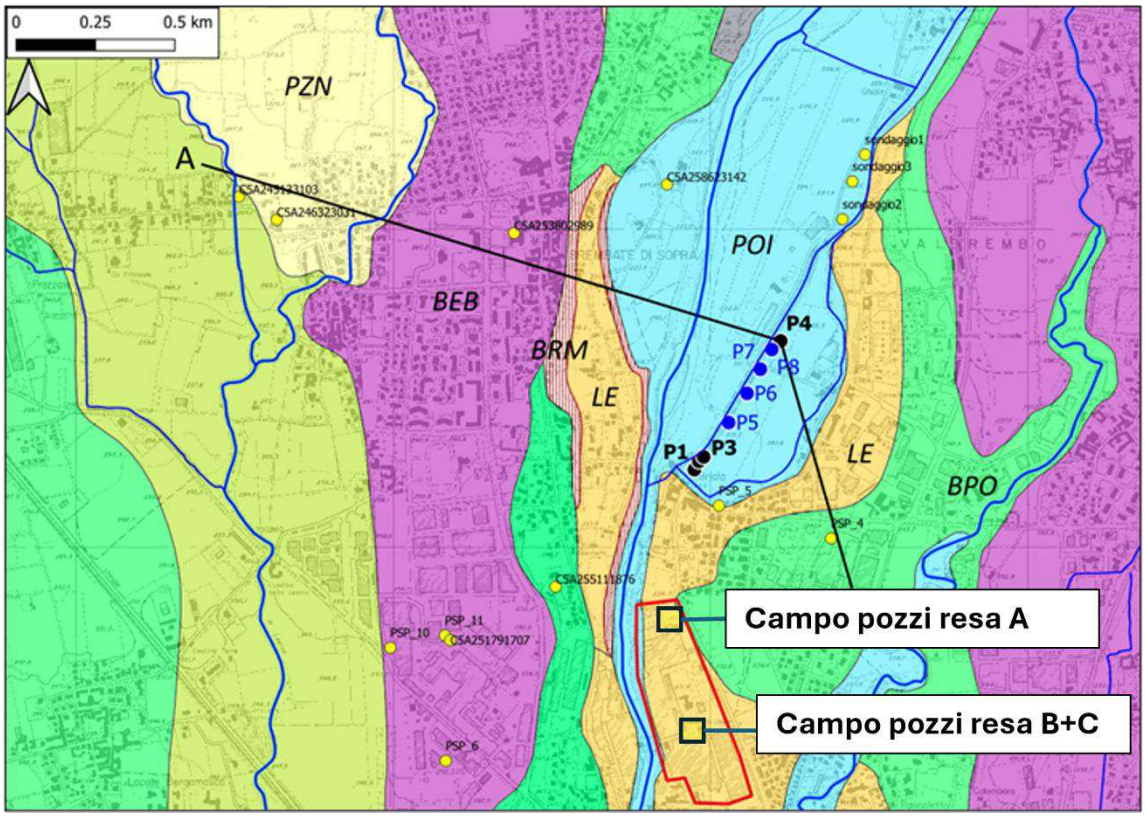


Figura 4 - stralcio della Carta Geologica d'Italia 1:50000 foglio 97 Vimercate. I punti in giallo indicano le stratigrafie disponibili nell'area, oltre a quelle del campo pozzi; sigle indicano le unità stratigrafiche citate nel testo; la linea nera rappresenta la traccia della sezione idrogeologica riportata in Figura 6.

Dal punto di vista idrostratigrafico, in accordo con la nuova classificazione adottata dal PTUA (Piano di Tutela e Uso delle Acque) 2016 della Regione Lombardia i pozzi in oggetto ricadono all'interno dell'Idrostruttura Superficiale (ISS). In questo settore l'idrostruttura ISS

comprende sia i depositi alluvionali e fluvioglaciali ghiaioso-sabbiosi ("gruppo A" secondo la precedente classificazione di Regione Lombardia e Eni del 2001) sia i sottostanti conglomerati del Ceppo del Brembo ("gruppo B" della classificazione 2001). Nell'area risulta assente l'idrostruttura Intermedia (ISI), presente solo a sud dell'area di Dalmine-Madone, e i gruppi A e B costituiscono un acquifero indifferenziato (il cosiddetto acquifero A/B, data l'assenza di livelli impermeabili con continuità apprezzabile) caratterizzato da una falda a carattere libero. In accordo con gli elaborati del PTUA la base dell'idrostruttura Superficiale ISS, in corrispondenza del campo pozzi è ubicata ad una quota di circa 200 m s.l.m. (Figura 5) che trova in linea di massimo riscontro dalle stratigrafie dei pozzi, che identificano la presenza del substrato roccioso a partire da 14-21 m dal piano campagna, che ha una quota mediamente di 220 m s.l.m.

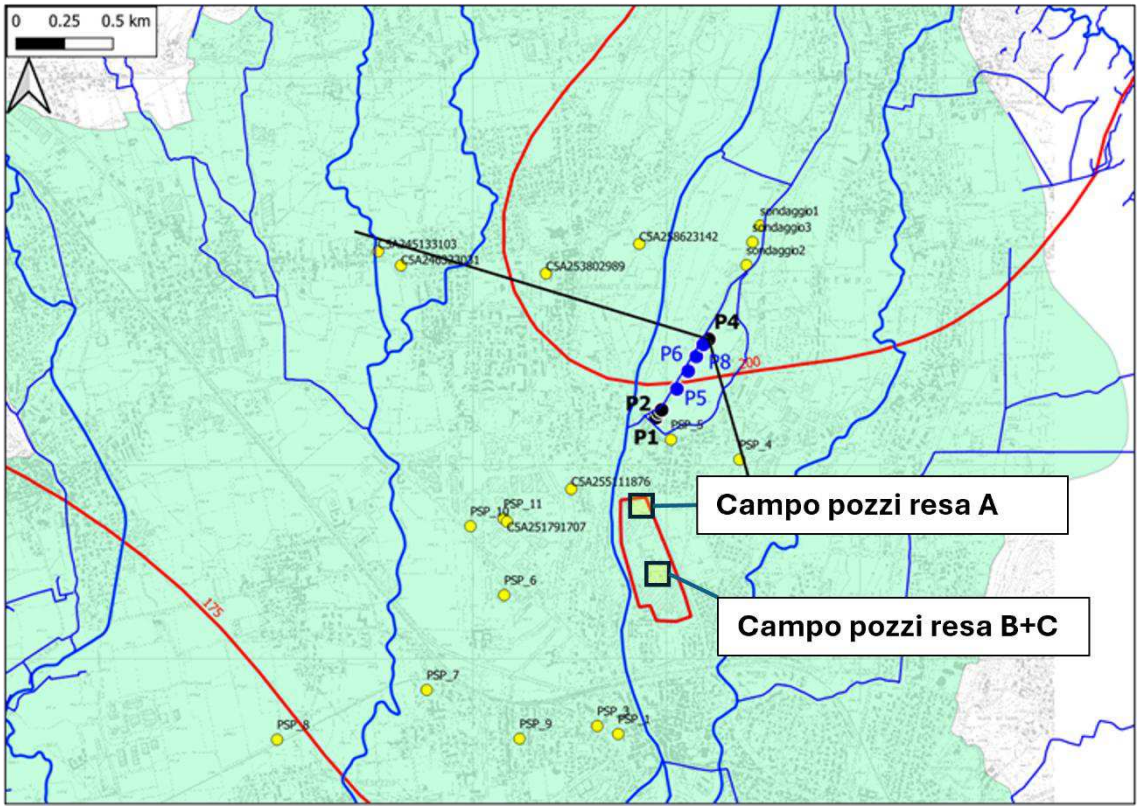


Figura 5 - estensione (area in verde) e quote della base (m s.l.m., linee rosse) dell'Idrostruttura Superficiale ISS (fonte PTUA).

4.2. Assetto idrogeologico locale dell'area del campo pozzi

A partire dall'inquadramento generale basato sulle informazioni disponibili dalla cartografia geologica ufficiale è stata eseguita una ricostruzione di maggiore dettaglio della struttura idrogeologica dell'area del campo pozzi e dei settori circostanti.

La ricostruzione è avvenuta a partire dalle stratigrafie dei pozzi Aruba e di altri pozzi e sondaggi disponibili nell'area. Complessivamente dalle diverse fonti (PGT comunali, Portale Cartografico Regione Lombardia, Altri studi geologici) sono state raccolte 20 stratigrafie in un'area di circa 7 km^2 nell'intorno del campo pozzi; complessivamente, considerando anche i pozzi Aruba, sono disponibili 28 stratigrafie

Sulla base di queste stratigrafie è stata redatta una sezione geologica passante per l'area del campo pozzi riportata in Figura 6 e, con risoluzione e dettaglio maggiori, in Allegato 2.

Nell'area del campo pozzi di presa il substrato roccioso, costituito da marne e arenarie, è rinvenuto a profondità comprese tra 11.2 m (P1) e oltre 21 m (P6, dove non è stato raggiunto al termine della perforazione); lateralmente le stratigrafie evidenziano un andamento del tetto del substrato blandamente ondulato con quote variabili tra 190 e 220 m s.l.m. Al di sopra del substrato, nell'area del campo pozzi sono presenti i depositi alluvionali ghiaioso-ciottolosi in matrice sabbiosa appartenenti al Sintema del Po, che costituiscono un corpo lenticolare, localizzato nei pressi dell'asta fluviale, con spessore massimo di 20-21 m e estensione laterale di alcune centinaia di metri. Tali depositi sono sede di una falda a carattere freatico con soggiacenza mediamente di 5 m, in probabile stretta connessione con le acque superficiali del Brembo, di cui costituisce la falda di subalveo (cfr. Par. 4.2.1). Ad est del campo pozzi, i depositi alluvionali recenti passano alle unità terrazzate più antiche di Lenna e Ponte S. Pietro, che presentano caratteristiche granulometriche e di permeabilità simili, mentre procedendo verso ovest sono in contatto laterale con il Ceppo del Brembo, costituito da un'alternanza di conglomerati lapidei ben cementati e livelli sabbioso-ghiaioso sciolti. Nell'area dei pozzi di resa, il substrato roccioso è rinvenuto a profondità di 25 m da p.c. e al di sopra di esso la stratigrafia appare simile a quella dell'area dei pozzi di presa, con la presenza di conglomerati fratturati del ceppo del Brembo e nei primi 5-6 m del sottosuolo da depositi alluvionali ghiaioso-sabbiosi.

Come premesso i depositi alluvionali e fluvioglaciali ed i conglomerati del ceppo costituiscono in quest'area l'unità idrostratigrafica ISS indifferenziata; l'assenza, infatti, di livelli impermeabili (argille) continui non determina la separazione idraulica tra depositi ghiaioso-sabbiosi e conglomerati che costituiscono pertanto un unico corpo acquifero. Nel sottostante substrato roccioso è presente una circolazione idrica nei livelli maggiormente fratturati o con porosità primaria più alta (arenarie) intervallati da livelli a permeabilità scarsa o nulla (marne e argilliti) captata da alcuni pozzi ad uso potabile o industriale che si spingono fino a oltre 100 m di profondità. Non sono disponibili informazioni dettagliate sulla piezometria o sulle caratteristiche idrodinamiche del substrato e non è possibile, pertanto, fare valutazioni su eventuali scambi idrici con la falda superficiale. Questi ultimi non possono essere esclusi soprattutto nel settore ovest rappresentato in sezione dove è presente un passaggio laterale tra il ceppo e i livelli arenacei del substrato. In corrispondenza della sponda

destra del Brembo la stratigrafia del pozzo C5A258623142 evidenzia, alla base dei depositi ghiaiosi e del Ceppo, la presenza di un livello di argille grigie con spessore di circa 40 m, che si può ipotizzare appartenere alla formazione di Tornago, di età pliocenica, affiorante alcuni km più a nord. La presenza di tali argille, caratterizzate da bassa permeabilità e di livelli marnosi al tetto del substrato, anch'essi scarsamente permeabili, suggeriscono che gli scambi idrici tra falda superficiale e substrato roccioso in corrispondenza del campo pozzi sono probabilmente di entità ridotta o comunque nettamente inferiori rispetto agli apporti idrici provenienti dall'infiltrazione delle acque di pioggia o dagli scambi con il fiume Brembo.

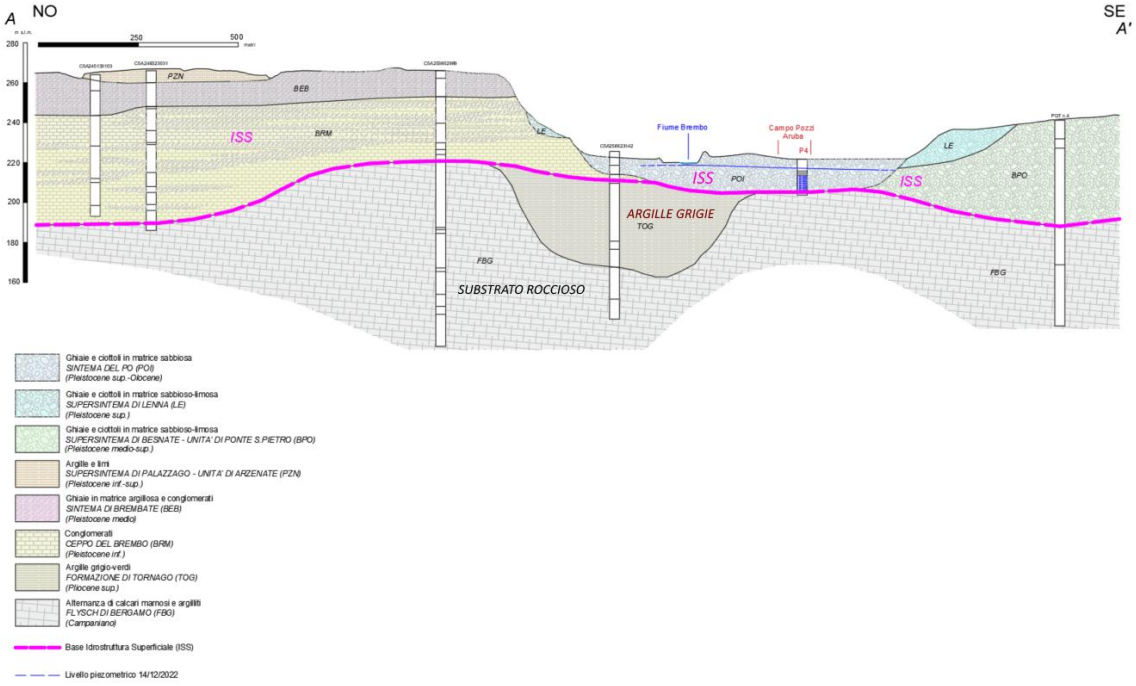


Figura 6 - sezione idrogeologica NO-SE passante per l'area del campo pozzi di presa (si veda per maggiore dettaglio l'Allegato 2).

Sulla base delle stratigrafie disponibili è stata ricostruito l'andamento locale delle quote della base del complesso acquifero superficiale (ISS) dal quale attingono i pozzi Aruba, riportato in Figura 7. La ricostruzione di dettaglio risulta in linea generale coerente con quella a più grande scala del PTUA, con quote comprese tra 200-210 m s.l.m. nella zona del campo pozzi ed un generale approfondimento in direzione sud e sud-ovest.

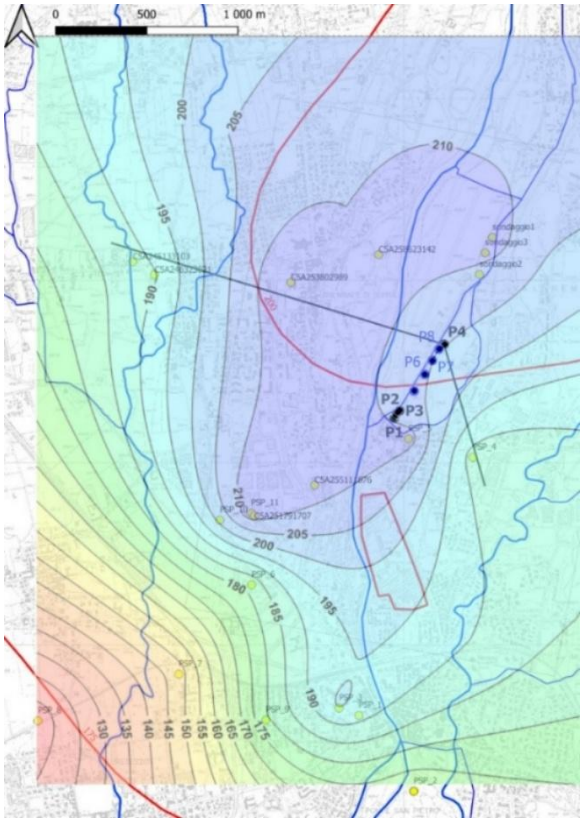


Figura 7 - Quote della base dell'acquifero superficiale (idrostruttura ISS in accordo con il PTUA) ricostruite sulla base delle stratigrafie disponibili nell'area.

4.2.1. Piezometria

Le informazioni ufficiali più aggiornate che è stato possibile reperire, relative all'assetto piezometrico nell'area, sono rappresentate dalle elaborazioni eseguite per il PTUA della regione Lombardia, riferite all'idrostruttura superficiale ISS, per i mesi di maggio e settembre 2014 (rispettivamente in rosso e in blu in Figura 8). Le piezometrie evidenziano una direzione di flusso prevalente da NNE a SSO; lungo l'asta fluviale del Brembo (Figura 8) si evidenziano livelli piezometrici generalmente più alti rispetto alle aree circostanti, con una divergenza delle direzioni di flusso - accentuata in particolare a maggio 2014 - sia verso SSO che SSE che testimoniano il ruolo di alimentazione delle acque superficiali del Brembo nei confronti della falda. Il gradiente idraulico è mediamente dell'8‰, le variazioni dei livelli piezometrici tra le 2 campagne di misura sono nell'ordine di 1-2 m.

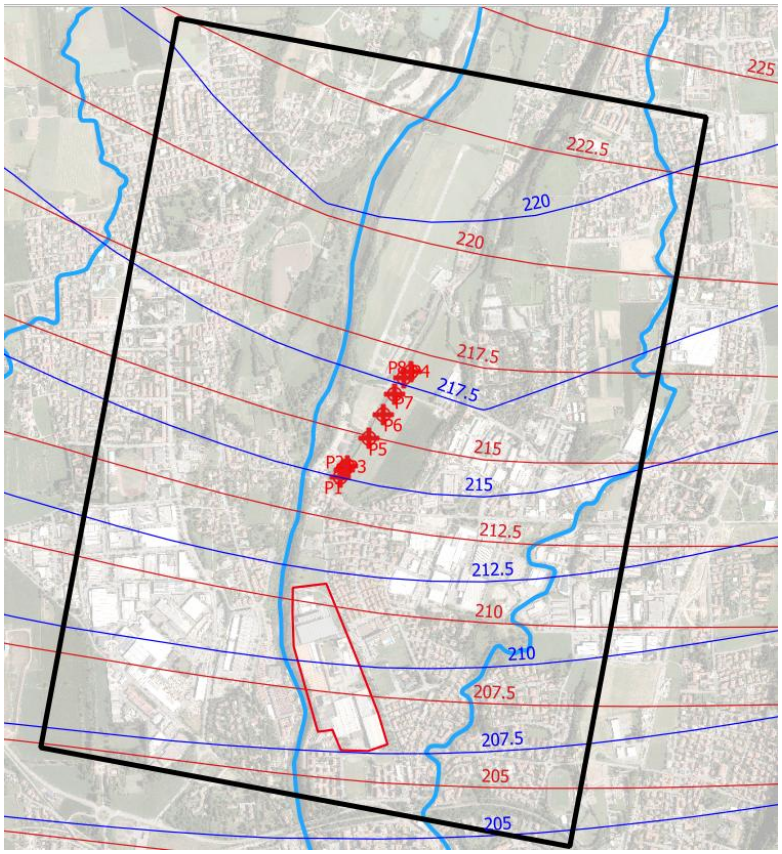


Figura 8 - ricostruzioni piezometriche di maggio 2014 (in rosso) e settembre 2014 (in blu) contenute nel PTUA della Regione Lombardia (ridisegnato).

Per valutare con maggior dettaglio l'assetto piezometrico e le direzioni di flusso locali della falda in corrispondenza del campo pozzi, il 14 dicembre 2022 è stata eseguita una campagna di misure piezometriche ad hoc in condizioni statiche, circa 3 ore dopo lo spegnimento di tutti i pozzi. Oltre ai pozzi Aruba sono stati misurati i livelli in alcuni pozzi esterni disponibili, ubicati nei pressi delle piscine e del campo sportivo di Ponte S. Pietro e nel parco faunistico delle Cornelle (quest'ultimo era in funzione e non disattivabile, la misura corrisponde quindi ad un livello dinamico). Sono stati inoltre rilevate le misure del pelo libero delle acque superficiali del canale Legler e del fiume Brembo in corrispondenza di punti appositamente quotati tramite battuta topografica.

I livelli misurati sono riportati in Tabella 2 mentre in Figura 8 è rappresentata la ricostruzione della piezometria a scala locale. Nonostante il ridotto numero di punti di misura disponibili viene confermata la direzione di flusso locale da NNO a SSE già emersa dalle elaborazioni del PTUA; i livelli piezometrici appaiono paragonabili a quelli del 2014. Il livello del pelo libero del fiume Brembo risulta circa 1.5 m maggiore di quello rilevato nei pozzi ed evidenzia il ruolo di alimentazione del fiume nei confronti della falda. La soggiacenza media

della falda da piano campagna nell'area dei pozzi di presa è, nelle condizioni di magra che hanno caratterizzato il 2022, compresa tra 4 e 4.5 metri (5-.5.5 m da bocca pozzo), considerate le profondità locali del substrato roccioso lo spessore saturo dell'acquifero risulta mediamente compreso tra 9 e 16 metri.

In corrispondenza dei pozzi di resa la soggiacenza della falda, rilevata durante la perforazione dei pozzi è risultata tra 13 e 16 m da p.c. nel campo pozzi A e tra 15 e 17 m nei campi pozzi B e C.

Tabella 2 - livelli piezometrici e livelli dei corsi d'acqua superficiali rilevati nel corso della campagna di misura del 14 dicembre 2022

Pozzo	**X**	**Y**	**Quota riferimento [m s.l.m.]**	**Soggiacenza [m da rif.*]**	**Livello piezometrico [m s.l.m.]**
P1	545921.0	5062224.0	221.44	5.08	216.405
P2	545935.0	5062250.0	221.87	5.37	216.55
P3	545950.0	5062264.0	221.81	5.31	216.5
P4	546193.0	5062629.0	222.67	5.45	217.27
P5	546029.0	5062372.0	222.46	5.68	216.78
P6	546087.0	5062464.0	222.39	5.41	216.99
P7	546129.0	5062540.0	222.85	5.62	217.28
P8	546165.0	5062602.0	222.43	5.23	217.2
Pozzo Piscine	546169.5	5061564.7	235	19.36	213.84
Pozzo Stadio	546031.9	5060994.3	230.36	20	210.36
Pozzo Cornelle sud	546473.8	5062502.7	236.409	21.51	214.609
Canale Legler via Marconi	546122.3	5062558.2	221.58	5.42	217.33
Brembo idrometro p.te Briolo	545731.7	5062000.9			216.57**
Brembo sponda via delle Ghiaie	545928.5	5062558.2			218.66***

*la soggiacenza misurata nei pozzi è riferita alla bocca pozzo, che ha una quota mediamente 1-1.5 m superiore rispetto al piano campagna

**quota assoluta ricavata dai dati di monitoraggio reperibili dal sito di ARPA Lombardia

*** quota assoluta del pelo libero del fiume Brembo ottenuta tramite rilievo topografico in alveo della sponda

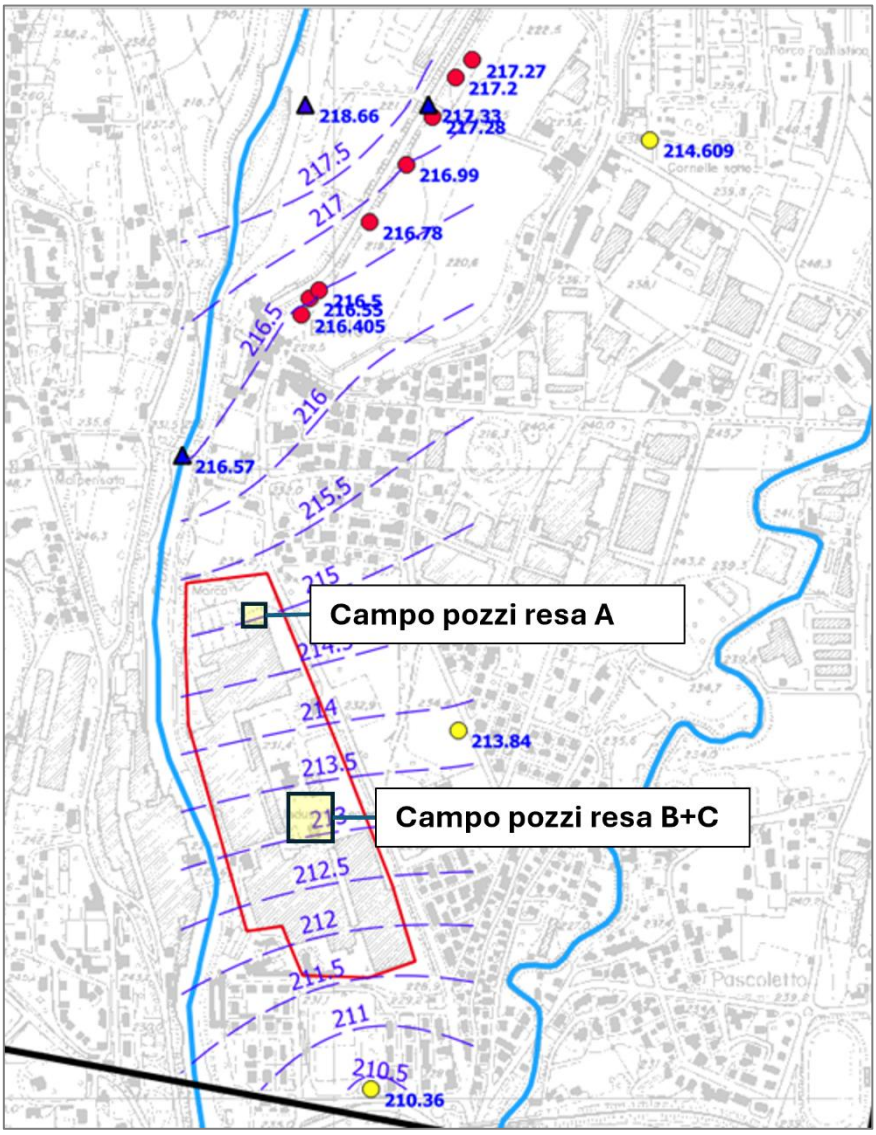


Figura 9 - Ricostruzione piezometrica a scala locale (in condizioni statiche) basata sulle misure del 14 dicembre 2022 riportate in tabella 4.

4.2.2. Prove su pozzi e conducibilità idraulica

Come premesso, per dettagliare le caratteristiche di trasmissività e produttività nell'area del campo pozzi sono state eseguite 5 prove di pompaggio a portata costante sui pozzi P2, P4 e sui nuovi pozzi P5, P6 e P8. Le prove sono state eseguite attivando il pozzo e mantenendolo ad una portata costante per 24-36 ore e monitorando gli abbassamenti e l'andamento della temperatura dell'acqua nei pozzi adiacenti in continuo tramite datalogger. Per evitare ogni disturbo, nel corso delle prove sono state mantenute costanti le portate degli altri pozzi del campo attivi. Per i dettagli relativi alle modalità di esecuzione delle prove, ai dati

di monitoraggio e alla loro interpretazione si rimanda all'Allegato 1, in Tabella 3 sono riassunti i risultati ottenuti.

Gli effetti del pompaggio alle portate di prova si risentono nei punti di monitoraggio adiacenti, con abbassamenti variabili tra 0.13 m e 0.5 m; durante il pompaggio non si registrano variazioni significative nella temperatura delle acque emunte

L'interpretazione delle curve abbassamento tempo registrate nei punti di monitoraggio, con l'utilizzo del metodo di Cooper-Jacob mostrano trasmissività comprese tra 8,7x10-2 e 3,2x10-1. I valori di conducibilità idraulica risultano da alti a elevati e, considerando uno spessore saturo medio di 16 m variano tra valori di circa 5x10-3 nell'area più a sud (pozzi P2 e P5) e valori di 7,3x10-3 -2x10-2 nel settore nord (pozzi P6, P8, P4).

Tabella 3 - valori di trasmissività e conducibilità idraulica ottenuti dall'interpretazione delle prove di pompaggio

Pozzo	Trasmissività [m²/s]	Conducibilità idraulica [m/s]
P2	$8,7x10^{-2}$	$5,4x10^{-3}$
P4	$2,8x10^{-1}$	$1,7x10^{-2}$
P5	$9,2x10^{-2}$	$5,7x10^{-3}$
P6	$3,2x10^{-1}$	$1,9x10^{-2}$
P8	$1,2x10^{-1}$	$7,3x10^{-3}$

5. MODELLO DI FLUSSO

Definito l'aggiornamento del modello concettuale dell'area di studio in seguito alle nuove prove ed indagini eseguite, è stato implementato il modello numerico di flusso, con lo scopo di valutare l'impatto dei pozzi sulla falda locale in funzione alle portate di progetto previste. In particolare, il modello di flusso ha permesso di stimare, in ogni pozzo, gli abbassamenti (o gli innalzamenti nel caso dei pozzi di resa) della falda rispetto al livello piezometrico statico.

Il presente paragrafo descrive le modalità di costruzione e i risultati di tale modello, realizzato con il codice di calcolo MODFLOW-USG[1] e con interfaccia grafica Groundwater Vistas v. 7.24 (Esi).

[1] Panday, Sorab, Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, Motomu, and Hughes, J.D., 2013, MODFLOW-USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A45, 66 p., https://doi.org/10.3133/tm6A45

5.1. Dominio e griglia di discretizzazione

L'estensione del dominio (Figura 13) sulla quale sono state effettuate le simulazioni è 2100x2800 m, per un'area totale di circa 5,8 km2 discretizzata tramite celle quadrate di 20x20 m.

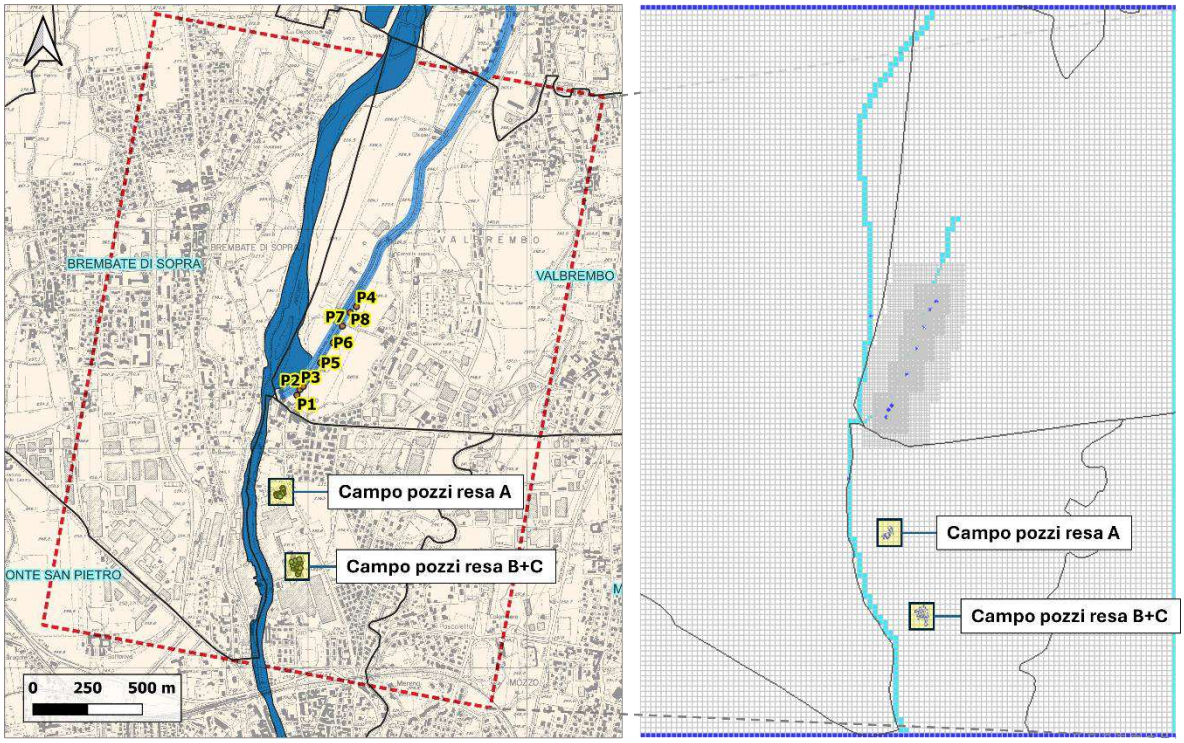


Figura 10 - Estensione del dominio del modello su ba se CTR (in rosso a sinistra) e planimetria dello stesso sul software Groundwater Vistas (a destra).

Sulla base del modello concettuale (Figura 4), il numero di layer che è stato scelto per la discretizzazione verticale è di 2 layer che rappresentano rispettivamente:

- Layer 1: depositi ghiaioso-sabbiosi e conglomerati costituenti l'acquifero superficiale (idrostruttura ISS secondo la definizione del PTUA)
- Layer 2: parte superficiale del substrato roccioso (è stato considerato uno spessore uniforme di 15 m)

La distinzione in 2 layer è stata effettuata sulla base dei dati geognostici disponibili. Tra questi, oltre alle stratigrafie dei pozzi oggetti di studio, sono stati prese in considerazione le stratigrafie del database geotecnico regionale e di altre fonti come i PGT dei comuni limitrofi all'area di interesse.

La base del layer 1 corrisponde al limite inferiore dell'acquifero superficiale ed il suo andamento determina pertanto il comportamento della falda freatica di sub-alveo che ha sede in questi depositi. La geometria di questa superficie è stata ottenuta interpolando tra di

loro le quote dei contatti litologici attribuibili a tale limite, individuati nelle stratigrafie disponibili.

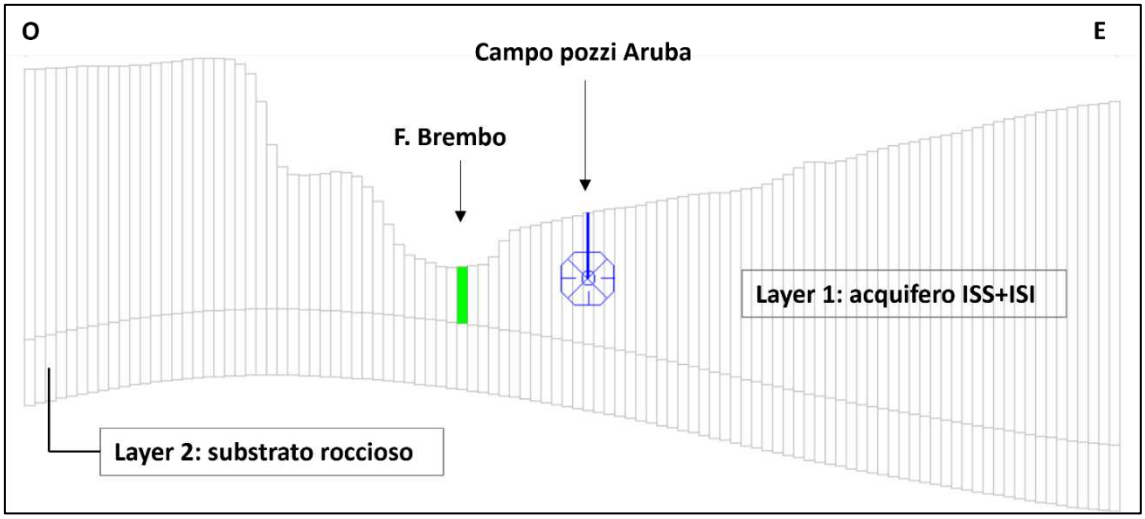


Figura 11 - Sezione O-E della porzione centrale del modello, in prossimità del campo pozzi. Si possono notare i due layer che rappresentano rispettivamente l'acquifero superficiale costituito prevalentemente da depositi alluvionali grossolani e il substrato roccioso sottostante (Flysch di Bergamo).

Al fine di aumentare il dettaglio della simulazione, l'area in corrispondenza dei pozzi è stata successivamente infittita tramite una griglia telescopica del tipo «Quadtree», costituita da celle di dimensioni variabile con l'avvicinarsi ai pozzi, fino ad una spaziatura minima di 2.5x2.5 m (Figura 12).

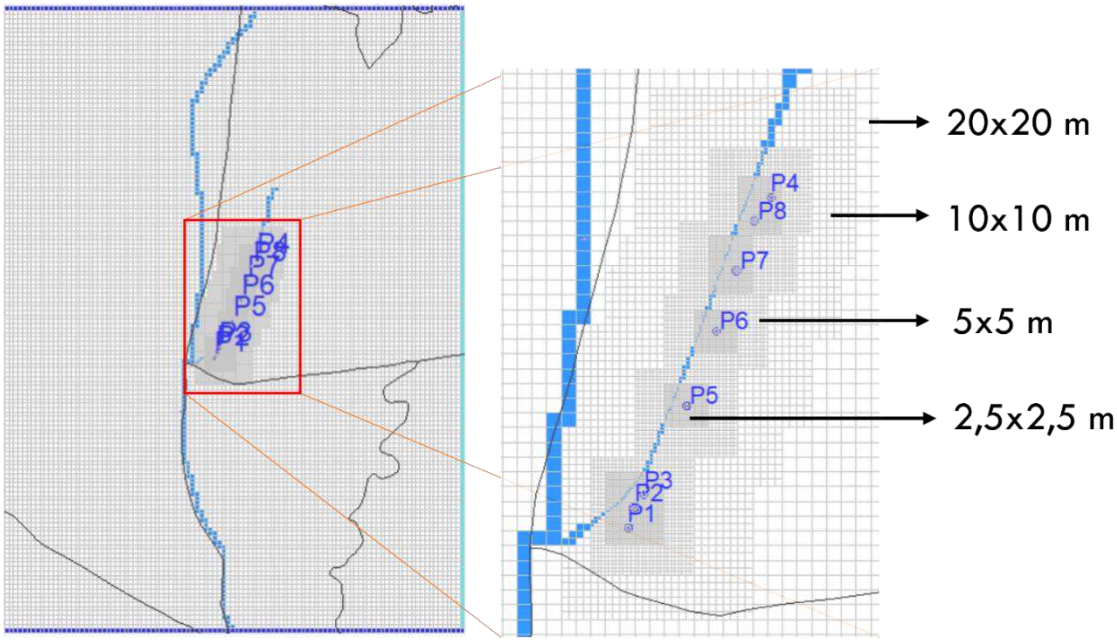


Figura 12 - Dettaglio sull'infittimento telescopico della griglia del dominio.

5.2. Condizioni al contorno e parametri idrodinamici

Condizioni ai limiti esterni del modello

Le condizioni al contorno inserite prevedono l'utilizzo sia di condizioni tipo Dirichelet (carico costante) che di condizioni tipo Cauchy (flusso dipendente dal carico) e sono state definite sulla base delle piezometrie del PTUA di maggio e settembre 2014, il cui andamento trova corrispondenza anche nella piezometria locale realizzata ad hoc a dicembre 2022 (capitolo 4.2.1). Le medesime piezometrie sono state utilizzate per definire l'orientazione della griglia, i cui limiti superiore e inferiore sono, ai fini della modellazione, circa perpendicolari alla direzione di flusso della falda. In prossimità di questi limiti, che sono posti ad oltre 1 km di distanza dalla zona dei pozzi per evitare interferenze, si trovano le condizioni di carico costante (Figura 13).

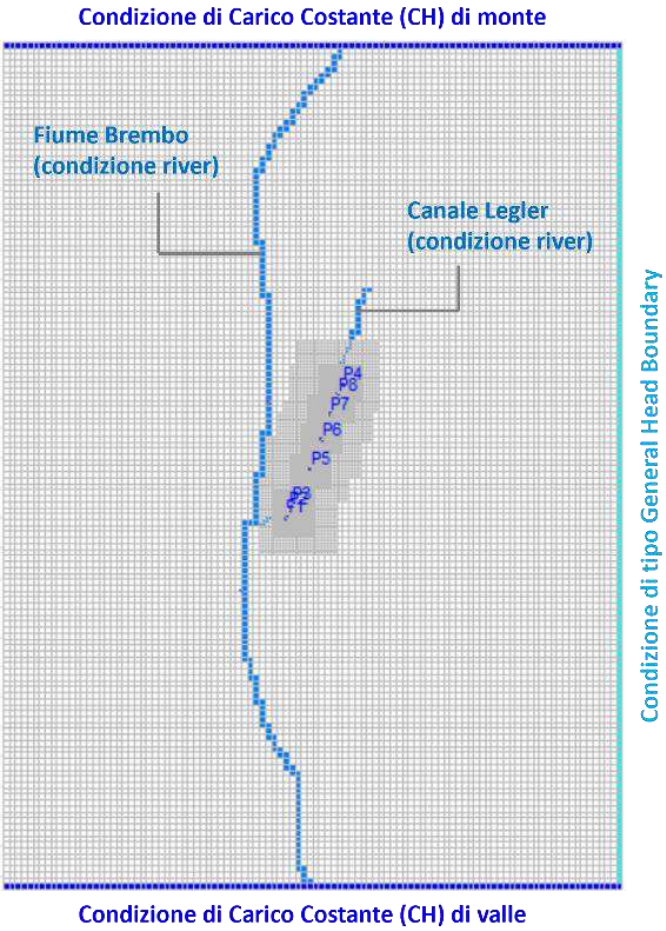


Figura 13 - Schematizzazione delle condizioni al contorno inserite nel modello.

Sulla porzione orientale dell'area modellata è stata invece posta una condizione GHB (General Head Boundary) che rappresenta il flusso in entrata nel modello proveniente dai

settori di alto morfologico che si ritrovano in quella zona. Tale condizione si basa nuovamente sull'interpretazione delle piezometrie pregresse succitate.

Fiume brembo e canale Legler

Il reticolo idrografico, in questo caso costituito dal Fiume Brembo e dal Canale Legler, è stato simulato tramite il pacchetto "river" di Modflow, che richiede l'inserimento dei livelli idrometrici dell'alveo oltre che della geometria di quest'ultimo. Per i livelli idrometrici del Fiume Brembo è stato fatto affidamento ai dati misurati in continuo presso la stazione idrometrica di Ponte di Briolo (Figura 14), oltre che alle misure effettuate durante i sopralluoghi svoltisi tra i mesi di dicembre 2022 e febbraio 2023.

Per quanto riguarda la geometria dell'alveo sono stati utilizzati i rilievi AIPO delle sezioni risalenti al 2002 (Figura), lungo le quali, oltre alla larghezza, è stata individuata anche la quota del punto più profondo dell'alveo. L'unione delle quote di tali punti ha definito la pendenza del fiume nei tratti compresi tra di essi.

Sulla base dei livelli idrometrici, della geometria e della conducibilità idraulica del letto del fiume inseriti, Modflow calcola in automatico il parametro della conduttanza idrica, che determina la relazione del corpo idrico superficiale con la falda.

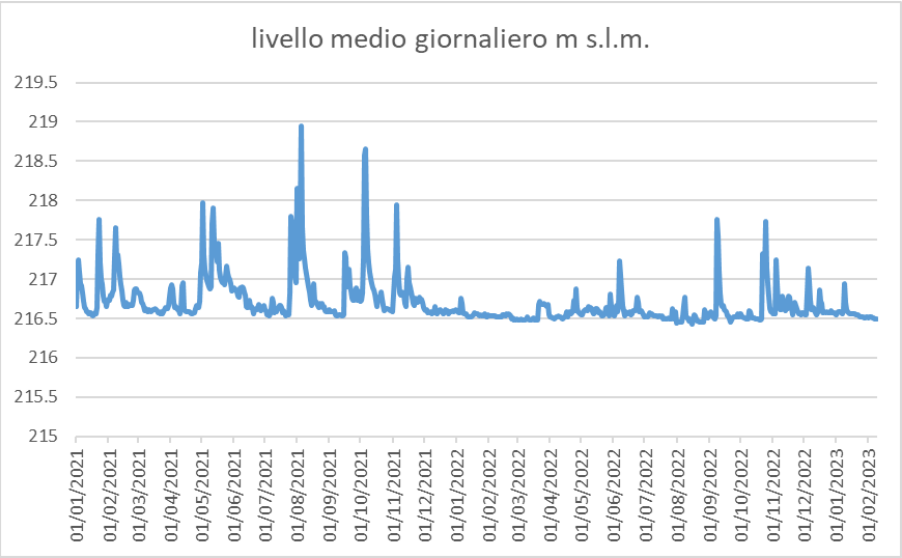


Figura 14 - andamento del livello idrometrico del Fiume Brembo presso la stazione di Ponte di Briolo.

Per quanto riguarda il canale Legler, sono state utilizzate le informazioni disponibili negli elaborati riguardanti i canali di adduzione e di scarico della centrale idroelettrica di Ponte San Pietro. In particolare, sono state prese in considerazione le sezioni trasversali e longitudinali del canale, oltre che alla planimetria dello stesso (elaborati PB_114A, PB_115A, PB_116A). Da tali elaborati sono state ricavate le caratteristiche geometriche del canale, quali la

larghezza (mediamente 11 m) e la variazione della quota di fondo verso valle, oltre che valutazioni sulla battente idrico medio (di circa 40 cm).

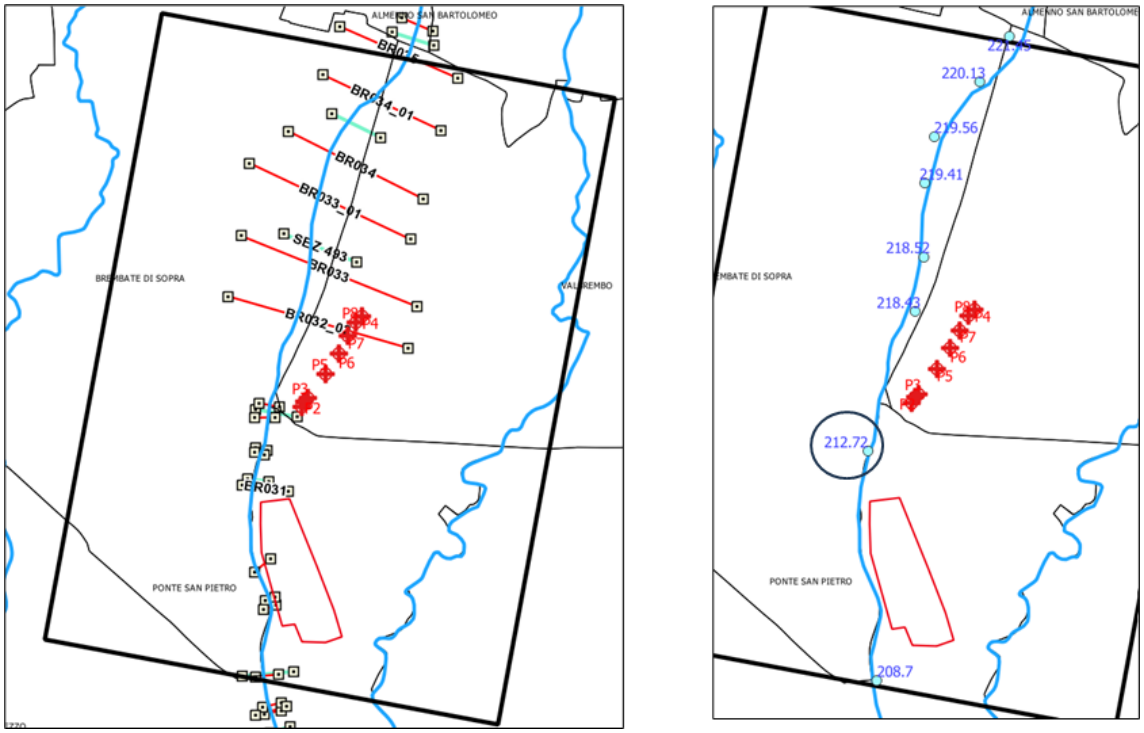


Figura 15 - a sinistra, sezioni dell'alveo del Brembo (fonte: AIPO); a destra livelli idrometrici. Cerchiato in nero l'idrometro di Ponte di Briolo.

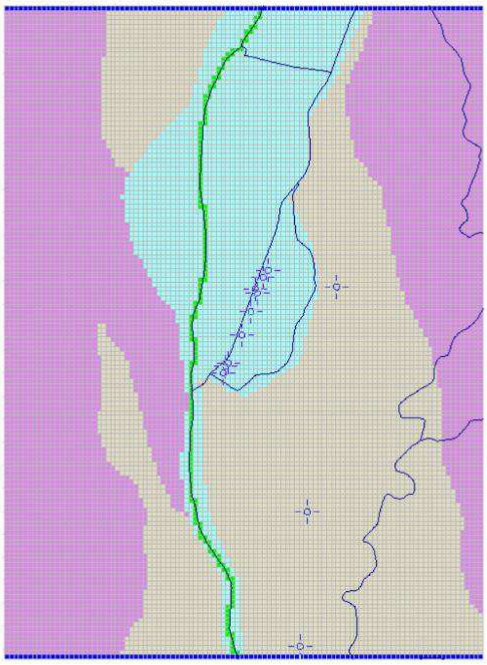
Ricarica meteorica

Il contributo alla ricarica della falda derivante dalle piogge è stato calcolato con l'ausilio del programma SWB2 sviluppato dall'USGS (Westenbroeck et al., 2010). La ricarica è stata calcolata a partire dai dati termo-pluviometrici delle stazioni meteo di Bergamo via Stezzano, Bergamo via Goisis e Filago, considerando parametri quali l'evapotraspirazione, l'uso del suolo e la pendenza della superficie topografica.

Il valore medio ottenuto nell'area considerata per il periodo 2019-2022 è pari a 5x10-8 m/s (470 mm/anno).

Conducibilità idraulica

La distribuzione iniziale di permeabilità (Figura 16) è stata definita sulla base delle caratteristiche litologiche e granulometriche delle diverse unità allostratigrafiche indicate nel foglio geologico CARG 1:50.000 Vimercate, sui risultati delle prove di pompaggio a portata costante eseguite (cfr. Par.4.4) e successivamente è stata affinata attraverso una stima preliminare con il software di calibrazione/ottimizzazione PEST (Doherty, Hunt, 2010). Un ulteriore affinamento, di maggiore dettaglio, della conducibilità idraulica è stata formulata in fase di calibrazione come illustrato nel Par. 5.3.



Sintema del Po (unità postglaciale) → 1E-02 m/s

Allogruppo di Lenna/ Ponte San Pietro (Wurm auct) → 5E-03 m/s

Sintema di Brembate (Riss-Wurm auct) + ceppo → 5,5E-04 m/s

Figura 16 - distribuzione preliminare dei valori di conducibilità idraulica assegnati al Layer 1 (acquifero superficiale) del modello

Al layer 2, corrispondente al substrato roccioso, è stato invece attribuito un valore di conducibilità idraulica costante pari a 1.2E-06 m/s.

5.3. Calibrazione e validazione

La calibrazione di un modello è un processo che prevede la variazione dei valori dei parametri di input (ad esempio la permeabilità, la ricarica artificiale) al fine di ottenere la migliore riproduzione delle condizioni di livello e/o flusso di riferimento entro un margine di errore ritenuto accettabile (ad es. la minima differenza tra i livelli della falda simulati dal modello e quelli osservati dalle misure in campo). In seguito alla variazione di uno o più parametri, l'accuratezza del modello viene verificata sia tramite confronto tra i valori simulati e le rispettive osservazioni, sia attraverso alcuni indicatori statistici. La validazione è uno step successivo alla calibrazione e consiste nella verifica della buona corrispondenza dei risultati del modello calibrato con i dati osservati anche con set di dati diversi.

Una volta validato il modello è pertanto in grado di riprodurre con buona approssimazione il sistema fisico di interesse (livelli e direzioni di flusso della falda, effetti dei pompaggi ecc.) e

può essere considerato un valido ed affidabile strumento a supporto della progettazione e della gestione dei pozzi.

Successivamente alla definizione preliminare descritta nel paragrafo precedente, è stata eseguita una calibrazione di dettaglio dei valori e della distribuzione della conducibilità idraulica attraverso la simulazione degli effetti indotti sui livelli piezometrici delle prove di pompaggio eseguite tra gennaio e febbraio 2023. In particolare, sono state riprodotte con il modello matematico le prove di pompaggio eseguite sui pozzi P2, P6 e P4. Allo scopo di confrontare gli abbassamenti simulati con quelli misurati, gli abbassamenti misurati durante la campagna di prove di pompaggio sono stati implementati nel modello in transitorio impostato in modo tale da rispecchiare l'assetto dei pompaggi durante le prove stesse.

Il lavoro modellistico di calibrazione del modello è ben rappresentato dal confronto fra le curve di abbassamento simulate e osservate dal modello "pre-calibrazione" e "post calibrazione" (si riportano a titolo di esempio in Figura 17 i risultati relativi alla simulazione della prova sul pozzo P2). Attraverso il processo di calibrazione è stata dettagliata la distribuzione della conducibilità idraulica nell'area di studio preliminarmente stimata con un valore omogeneo di 1x10-2 m/s. Gli abbassamenti misurati sono stati utilizzati come «drawdown target» per il software di calcolo PEST, che ha stimato la distribuzione ottimale della conducibilità idraulica nell'intorno dei pozzi in modo da ottenere la migliore sovrapposizione tra le curve abbassamento/tempo osservate e simulate (Figura 17). Fra i parametri oggetto di stima è stata inserita anche la porosità efficace (θ, in questo caso pari al coefficiente di immagazzinamento Sy) il cui valore iniziale (18%) non è stato variato durante la fase di calibrazione. La corretta riproduzione delle curve di abbassamento/tempo osservate indica una buona capacità del modello di simulare in modo fedele le dinamiche del flusso idrico sotterraneo e gli effetti piezometrici indotti dai pompaggi. I valori e la distribuzione di conducibilità idraulica finali ottenuti nell'intorno di ogni pozzo al termine della calibrazione di dettaglio sono riportati in Tabella 4 e in Figura 18.

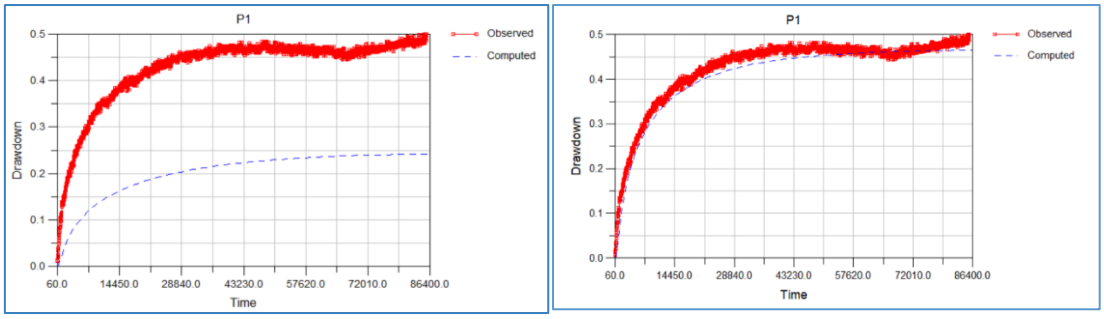


Figura 17 - Risultati relativi alla simulazione della prova sul pozzo P2, pre-calibrazione (a sinistra) e post-calibrazione con PEST (a destra). In rosso sono indicati gli abbassamenti misurati (reali) osservati nel pozzo P1 durante la prova di pompaggio sul pozzo P2, mentre in blu sono indicati gli abbassamenti stimati dal modello simulando la medesima prova. Si può notare la sovrapposizione delle due curve nel grafico post-calibrazione, ad indicare una distribuzione della conducibilità idraulica che implica un comportamento della falda più simile a quello reale.

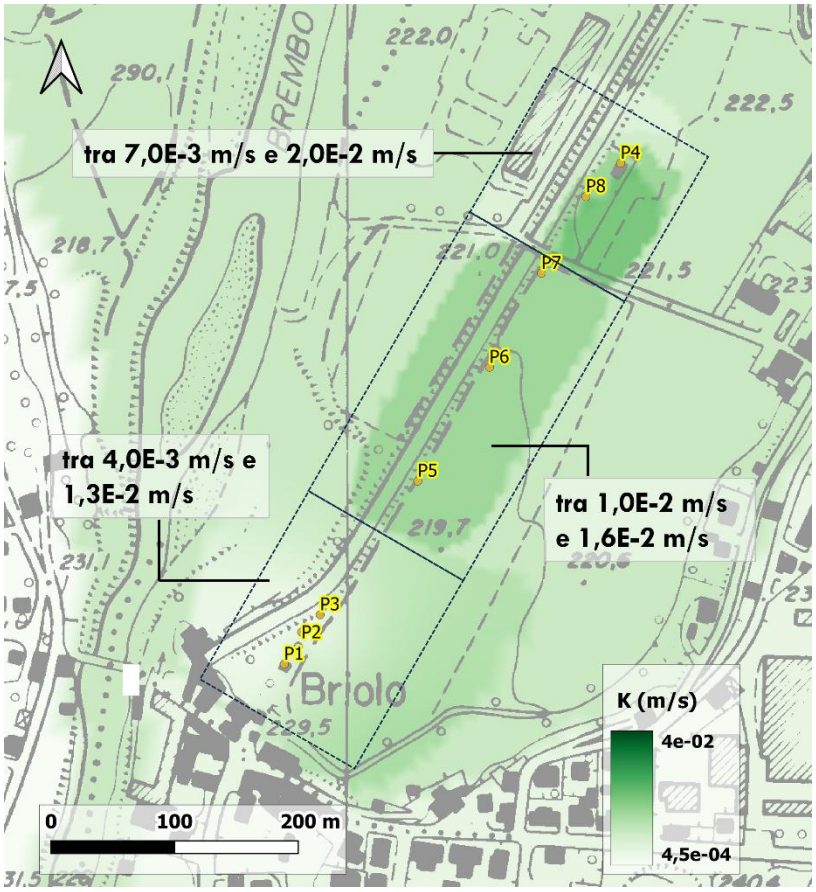


Figura 18 - Distribuzione della conducibilità idraulica ottenuta dalla calibrazione con PEST. Gli abbassamenti osservati durante le prove di pompaggio su P4, P6 e P2 sono state utilizzati calibrare gli intervalli di conducibilità dei depositi vicini ai punti in pompaggio.

Al fine di validare il modello è stata simulata la condizione piezometrica misurata durante la campagna del 14 dicembre 2022, durante la quale è stata eseguita una misura freatimetrica nei pozzi dopo circa 3 ore dallo spegnimento (cfr. Par. 4.2.1).

Tabella 4 - valori di conducibilità idraulica ottenuti in seguito alla calibrazione di dettaglio tramite simulazione delle prove di pompaggio

Prova di pompaggio	K originale omogenea inserita su base bibliografica [m/s]	Intervallo di K stimata nell'intorno della prova [m/s]
P2	1,0E-2	tra 4,0E-3 e 1,3E-2
P6		tra 1,0E-2 e 1,6E-2
P4		tra 7,0E-3 e 2,0E-2

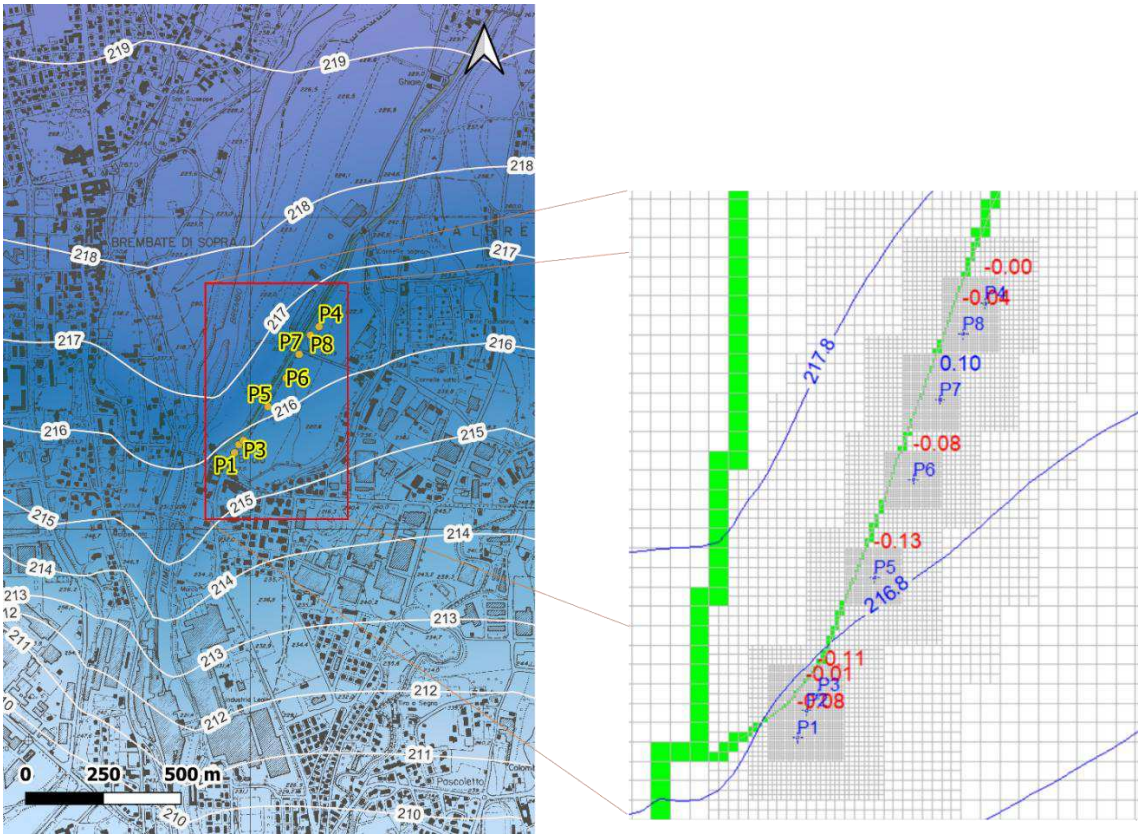


Figura 19 - A sinistra, piezometria simulata dal modello a tre ore dallo spegnimento dei pozzi, a partire dall'assetto dei pompaggi del 14 dicembre 2022 (data della campagna di monitoraggio piezometrico). A destra, dettaglio sulla zona del campo pozzi con indicati i residui (espressi in m) per ogni pozzo. Valori negativi indicano una sovrastima del modello

*Tabella 5 - indici statistici di calibrazione per la piezometria del 14 dicembre 2022 (i valori indicati con * sono calcolati come rapporto tra i rispettivi indici e il "range delle osservazioni" ovvero il range tra livello minimo e massimo registrato tra i punti di osservazione).*

Indice	**Valore**
Numero di target di osservazione	8
Media dei valori assoluti degli scarti [m]	0.07
Deviazione standard degli scarti [m]	0.069
Range delle osservazioni [m]	0.88
Media dei valori assoluti degli scarti normalizzata*	8%
Deviazione standard degli scarti normalizzata*	7.8%

La piezometria simulata ottenuta dal modello a 3 ore dallo spegnimento dei pozzi è riportata in Figura 19, che mostra una buona capacità del modello di riprodurre i livelli, le

direzioni di flusso e i gradienti piezometrici delle piezometrie ricostruite sulla base dei dati osservati (cfr. Figura 8 e Figura 9 nel Par.4.2).

I valori in corrispondenza di ogni pozzo rappresentano gli scarti (in metri) tra i livelli piezometrici misurati e quelli simulati che appaiono molto ridotti, quasi sempre inferiori a 10 cm. L'analisi degli indici statistici comunemente utilizzati per valutare la bontà della calibrazione (Tabella 5.) evidenzia infatti un valore medio degli scarti tra livelli misurati e simulati (calcolati come media dei valori assoluti degli scarti) di soli 7 centimetri. I valori della deviazione standard normalizzata degli scarti osservato-simulato, calcolata come rapporto tra deviazione standard degli scarti e differenza tra livello piezometrico massimo e minimo misurato nei piezometri di osservazione (range delle osservazioni), è pari a 7.8% ed inferiore al 10% che nella letteratura specialistica è considerato un valore indicativo di una buona calibrazione (Anderson, M.P. and Woessner, W.W. (1992) Applied Groundwater Modeling—Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381).

I risultati della simulazione rappresentano un ulteriore elemento di validazione del modello che appare pertanto idoneo per valutazioni più avanzate.

6. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEI POMPAGGI E DELLA REIMMISSIONE IN FALDA ALLE PORTATE DI PROGETTO

A partire del modello concettuale idrogeologico aggiornato e utilizzando il modello matematico di flusso fisicamente basato su di esso, calibrato e validato secondo le modalità descritte, sono state condotte delle simulazioni numeriche per valutare l'impatto sul contesto idrogeologico locale da parte dei pozzi di presa e di resa del complesso di Aruba.

In particolare, in accordo con le portate di concessione approvate, sono stati simulati gli scenari di pompaggio previsti con portata totale media (600 l/s) e massima (800 l/s) e per entrambi è stato possibile quantificare l'entità dell'impatto in termini di abbassamento piezometrico sulla falda acquifera, sia nelle immediate vicinanze del campo pozzi che a distanze maggiori. Per lo scenario di portata massima (800 l/s) si sottolinea che l'utilizzo di tale valore è previsto esclusivamente per brevi periodi, in condizioni di eccezionale necessità, e non rappresenta la condizione di esercizio ordinaria stabilita dal progetto per i pozzi.

Il modello numerico ha consentito anche di simulare la reimmisione in falda della totalità dell'acqua prelevata, tramite l'inserimento dei pozzi costituenti i campi pozzi di resa A, B e C prossimi allo stabilimento (Figura 1), e pertanto di stimare l'innalzamento piezometrico massimo potenziale alle diverse configurazioni progettuali. A tal fine è stata considerata una restituzione in falda dell'intera portata di pompaggio (nella configurazione attuale), il che rappresenta una ipotesi cautelativa non essendo possibile quantificare con precisione la quota scaricata direttamente nel Brembo attraverso il troppo pieno.

Come premesso, le simulazioni sono state eseguite nelle condizioni di livello piezometrico del 2022-2023 corrispondenti a condizioni di minimo livello della falda in un periodo particolarmente siccitoso e quindi cautelative in un'ottica di valutazione degli impatti del pompaggio sulla risorsa idrica sotterranea.

Tutti gli scenari sono stati simulati con un modello in transitorio di circa 8 mesi, durata sufficiente a valutare gli effetti dell'emungimento sia nel breve che nel lungo periodo.

I risultati delle simulazioni sono riportati nei paragrafi seguenti.

6.1. Effetti del pompaggio sui livelli piezometrici della falda

6.1.1. Scenario con portata media (600 l/s)

Il primo scenario prevede una richiesta di portata totale pari a 600 l/s, corrispondenti ad un volume di emungimento annuo di 18,888,000.0 m^3. Lo scenario ipotizza l'esercizio contemporaneo di sei degli otto pozzi facenti parte del sistema, nell'ottica di effettuare in fase di esercizio una rotazione tra i vari pozzi. Le portate di emungimento per ogni pozzo adottate per tale scenario sono sintetizzate in Tabella 6.

Le simulazioni modellistiche alla portata di 600 l/s hanno evidenziato abbassamenti massimi attesi nei singoli punti di pompaggio di poco superiori ai 2 metri[2] (Tabella 6), che risultano sostenibili dai singoli pozzi sulla base delle prove di collaudo eseguite. Nello specifico, solo P1 e P3 mostrano abbassamenti superiori ai 2 m, mentre negli altri pozzi si evidenziano valori compresi tra 1.2 m e 1.4 m. L'influenza dei pompaggi si dissipa rapidamente allontanandosi dal campo pozzi e risulta inferiore al metro già a poche decine di metri di distanza dallo stesso, come si può notare dalla isolinea di abbassamento 0.9 (Figura 20). A distanze maggiori si osservano abbassamenti molto limitati sia in direzione E verso il centro abitato che in direzione W verso l'alveo del Fiume Brembo. Complessivamente, tenendo conto dello spessore dell'acquifero nelle condizioni di minimo piezometrico, variabile tra 9 e 16 m (rif. Par. 4.2.1.) gli abbassamenti indotti dal pompaggio nelle aree adiacenti al campo pozzi risultano compresi tra il 5 e il 10% dello spessore saturo dell'acquifero determinando quindi un impatto limitato sulla risorsa idrica sotterranea.

[2] gli abbassamenti simulati sono riferiti all'abbassamento atteso nell'intorno del pozzo escludendo le perdite di carico all'interno del pozzo (non necessarie allo scopo del presente lavoro modellistico)

Tabella 6 – Portate di emungimento per ogni pozzo e sintesi degli abbassamenti massimi simulati in ogni punto e degli innalzamenti massimi simulati preso i campi pozzo di resa per lo scenario con portata media.

Pozzo	Scenario 600 l/s	
	Portata [l/s]	Abbassamento max simulato [m]
P1	65	2.1
P2	0	1.3
P3	90	2.2
P5	80	1.2
P6	115	1.4
P7	135	1.4
P8	0	1
P4	115	1.3
PORTATA TOT [l/s]	**600**	
Innalzamento max [m]		
Campo pozzi resa A	2.4	
Campo pozzi resa B	2.2	
Campo pozzi resa C	2.2	

Nella simulazione è stato considerato anche l'effetto della reimmissione in falda della totalità dell'acqua prelevata, attraverso i campi pozzi di resa A, B e C. Come conseguenza di ciò si genera in corrispondenza degli stessi un innalzamento massimo della falda di circa 2.2-2.4 m, che si riduce a pochi decimetri allontanandosi dalla zona dello stabilimento di Aruba S.p.A. (Figura 20). Tale risultato è cautelativo e a favore di sicurezza, in quanto si è ipotizzata la reimmissione in falda dell'intera portata in uscita dagli scambiatori, mentre nella realtà operativa è previsto lo scarico di una parte delle acque, tramite troppo pieno, direttamente nel fiume Brembo. In condizioni di operatività normale sono quindi da attendersi innalzamenti effettivi inferiori a quelli simulati. Gli innalzamenti simulati dal modello risultano coerenti con quelli evidenziati nel corso delle prove di immissione eseguite sui pozzi in fase di collaudo e, considerando i valori di soggiacenza della falda indisturbata nell'area del datacenter (13-17 m da p.c.) e il carattere localizzato degli innalzamenti stessi, non si configurano condizioni di potenziale criticità o di attenzione.

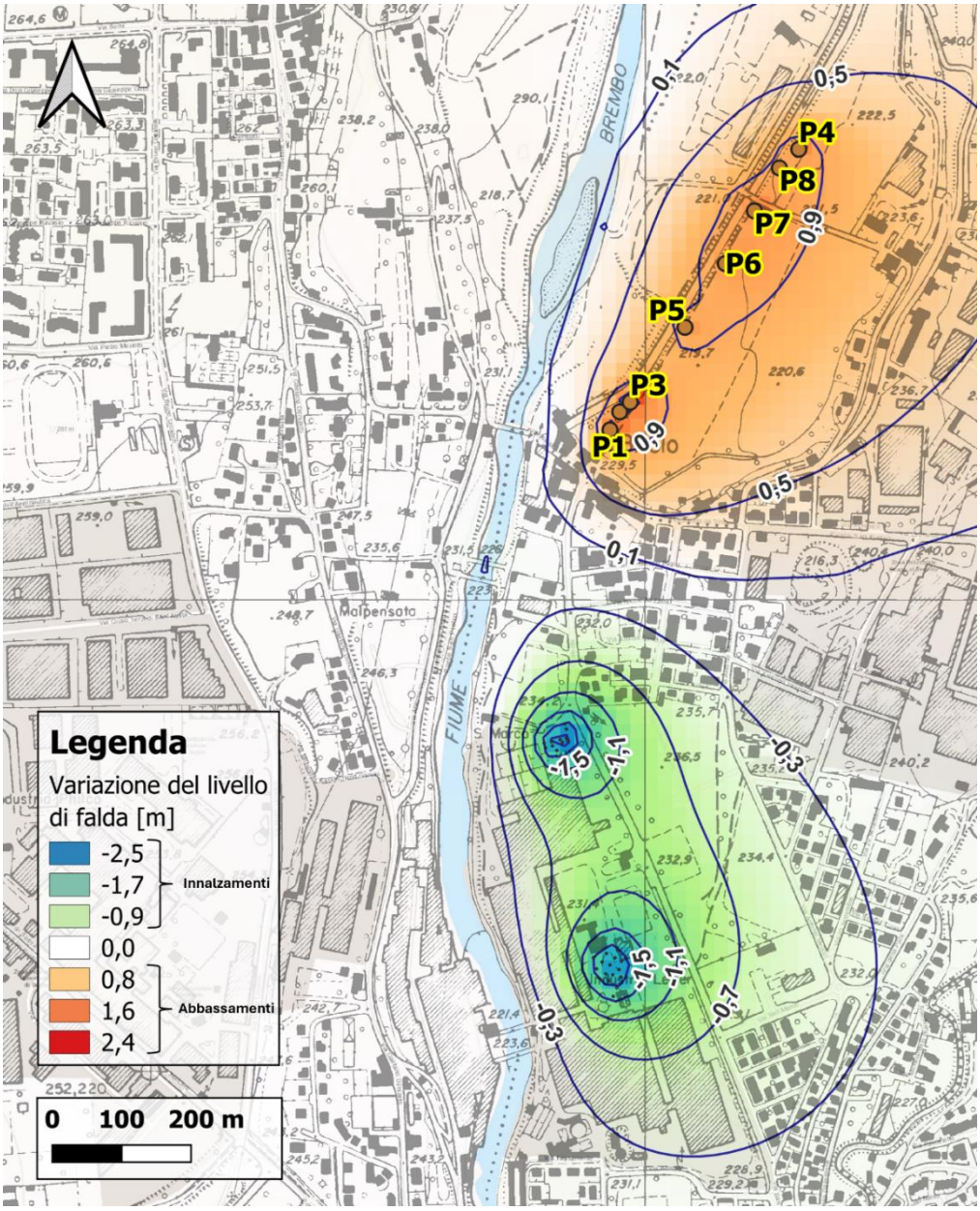


Figura 20 – Carta delle variazioni del livello di falda rispetto alle condizioni di falda indisturbata, scenario con 600 l/s totali. I valori positivi (in arancione/rosso) indicano gli abbassamenti e i valori negativi (in verde/blu) indicano gli innalzamenti.

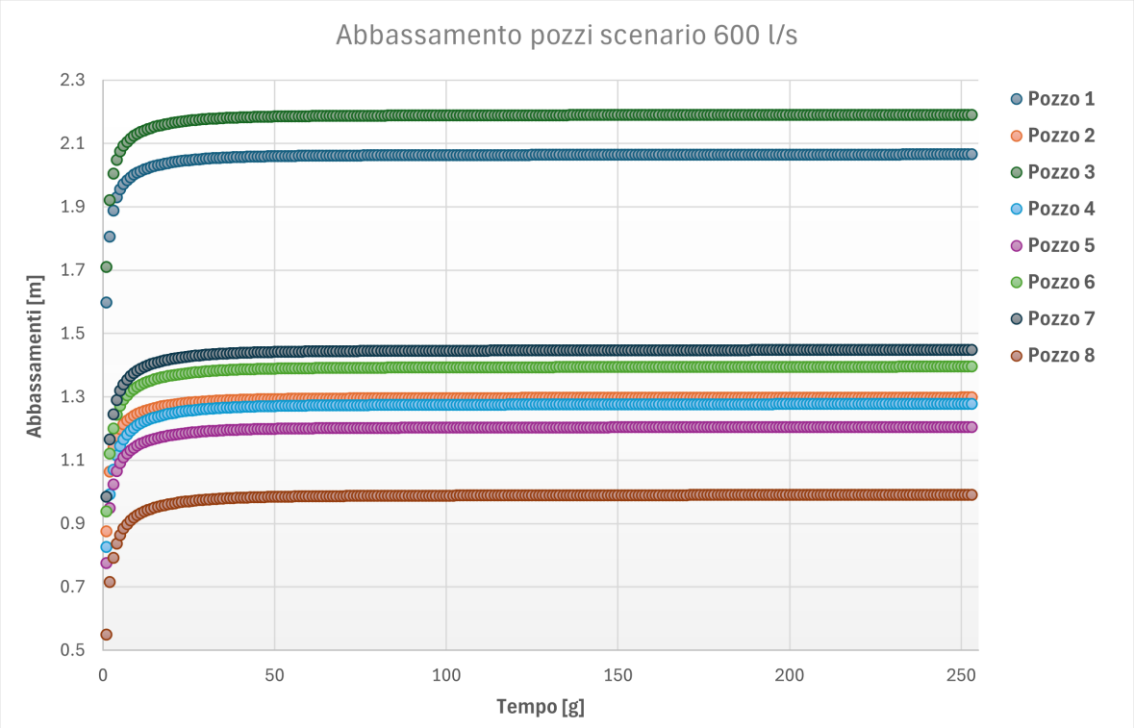


Figura 21 - Abbassamenti simulati nei pozzi nel tempo per lo scenario a 600 l/s.

Il grafico in Figura 21 rappresenta l'andamento nel tempo dei livelli simulati nei pozzi in pompaggio. Si evidenzia una rapida stabilizzazione dei livelli nei primi giorni dopo l'attivazione dei pompaggi, che rimangono costanti per l'intero periodo della simulazione (circa 8 mesi), indicando l'assenza di fenomeni di depauperamento della risorsa idrica a lungo termine.

6.1.2. Scenario con portata massima (800 l/s)

A completamento delle valutazioni, è stata eseguita una simulazione considerando anche la portata massima prevista dalla concessione approvata, pari a complessivi 800 l/s. Come premesso, l'utilizzo di tale portata è previsto esclusivamente per brevi periodi, in condizioni di eccezionale necessità, e non rappresenta la condizione di esercizio ordinaria prevista dal progetto per i pozzi.

Per questo scenario si ipotizza l'esercizio di tutti i pozzi contemporaneamente. Le portate di emungimento per ogni pozzo sono sintetizzate in Tabella 7.

Le simulazioni modellistiche di questo scenario hanno evidenziato abbassamenti massimi attesi nei singoli punti di pompaggio di poco superiori ai 3 metri che risultano sostenibili dai singoli pozzi sulla base delle prove di collaudo eseguite. Nello specifico, solo i

pozzi P1, P2 e P3 mostrano abbassamenti dell'ordine dei 3 m, mentre negli altri pozzi si evidenziano valori compresi tra 1.6 m e 1.8 m.

Anche in questo caso l'influenza dei pompaggi si dissipa rapidamente allontanandosi dal campo pozzi e si osserva una depressione piezometrica di poco superiore al metro a poche decine di metri di distanza dai punti (Figura 22). A distanze maggiori l'effetto dell'attivazione dei pozzi alle portate massime risulta più marcato rispetto a quanto si è osservato nello scenario precedente, come evidenziato dalla maggiore estensione dell'isolinea di abbassamento pari a 0,9 m, che interessa un'area più ampia rispetto allo scenario precedente rappresentato a quanto visto in Figura 20. L'abbassamento piezometrico indotto nelle aree circostanti il campo pozzi, analogamente a quanto già descritto per lo scenario di portata media, risulta in ogni caso complessivamente contenuto e comunque inferiore al 10% dello spessore saturo dell'acquifero. La simulazione può inoltre considerarsi cautelativa e improntata a favore di sicurezza, poiché la portata di 800 l/s è stata ipotizzata costante per un periodo prolungato, mentre, come indicato, tale assetto operativo sarebbe adottabile esclusivamente per brevi intervalli di tempo e solo in condizioni di eccezionale necessità. Alla luce di quanto esposto, in particolare per i ridotti abbassamenti, contenuti entro il 10% dello spessore saturo dell'acquifero e il carattere temporaneo previsto per lo scenario di massima portata, l'impatto sulla risorsa idrica sotterranea risulta anche in questo caso complessivamente ridotto.

Tabella 7 - Portate di emungimento per ogni pozzo e sintesi degli abbassamenti massimi simulati in ogni punto e degli innalzamenti massimi simulati preso i campi pozzo di resa per lo scenario con portata massima.

Pozzo	Scenario 800 l/s	
	Portata [l/s]	Abbassamento [m]
P1	75	3.1
P2	70	2.9
P3	100	3.1
P5	85	1.5
P6	125	1.7
P7	135	1.8
P8	85	1.6
P4	125	1.8
PORTATA TOT [l/s]	**800**	
Innalzamento max [m]		
Campo pozzi resa A	3.1	
Campo pozzi resa B	2.9	
Campo pozzi resa C	2.9	

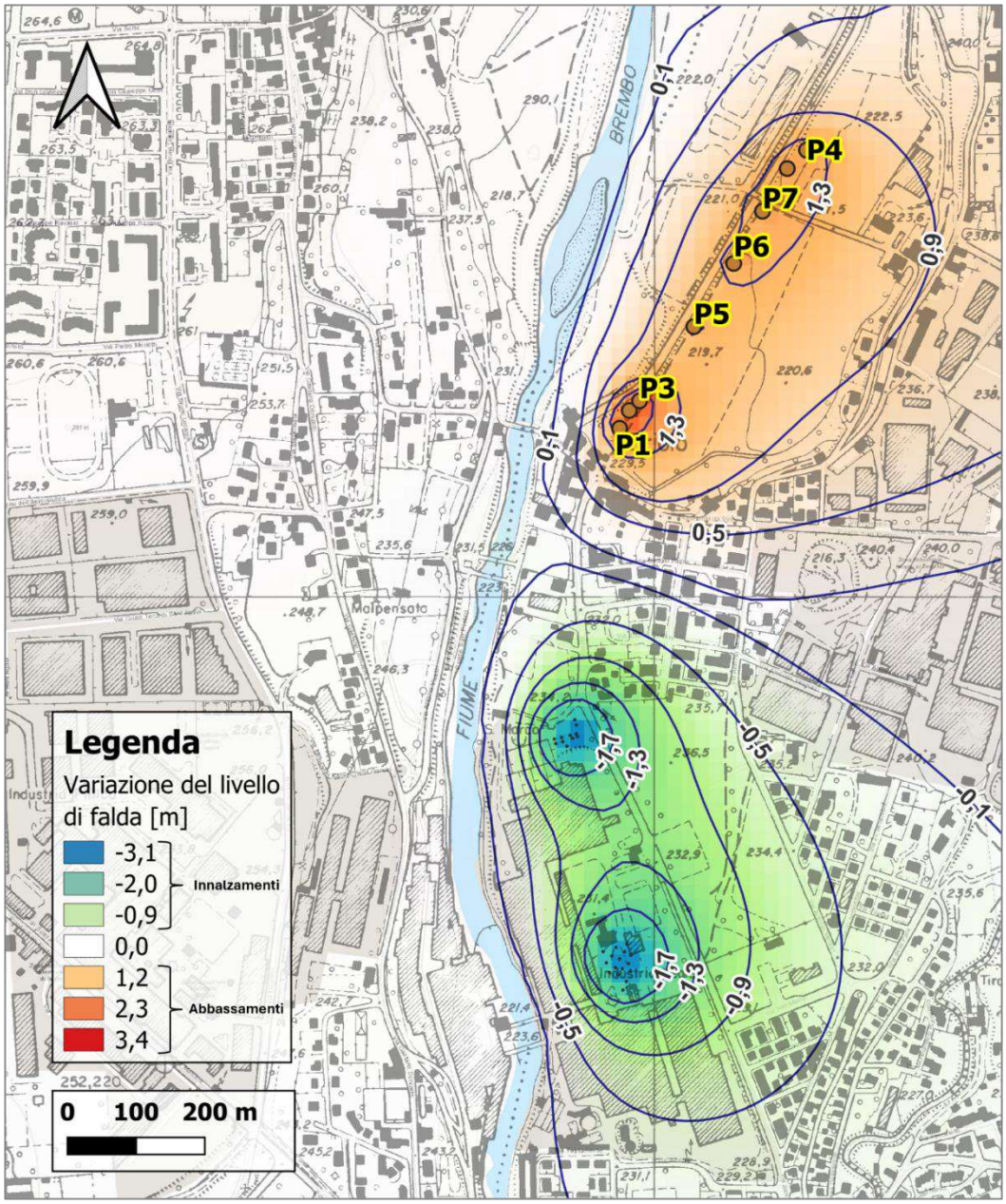


Figura 22 - Carta delle variazioni del livello di falda rispetto alle condizioni di falda indisturbata, scenario con 600 l/s totali. I valori positivi (in arancione/rosso) indicano gli abbassamenti e i valori negativi (in verde/blu) indicano gli innalzamenti.

Analogamente a quanto svolto per lo scenario con la portata media, la simulazione ha previsto anche la reimmisione in falda della totalità dell'acqua prelevata, attraverso i campi pozzi di resa A, B e C. Come conseguenza di ciò si genera in corrispondenza degli stessi un innalzamento massimo della falda di circa 2.9-3.1 m, che si riduce notevolmente allontanandosi dalla zona dello stabilimento di Aruba S.p.A. Anche in questo caso, come per lo scenario precedente, considerando i valori di soggiacenza della falda indisturbata nell'area del

datacenter (13-17 m da p.c.) e il carattere localizzato degli innalzamenti stessi, non si configurano condizioni di potenziale criticità o di attenzione.

6.2. VALUTAZIONE DELL'EVENTUALE INTERFERENZA CON LE OPERE DI PRESA IRRIGUE

Il MASE nelle prescrizioni contenute nel decreto di VIA chiede di valutare "eventuali interferenze" fra il campo pozzi e le opere di presa sul fiume Brembo del Consorzio di bonifica della media pianura bergamasca. Dal Sistema Informativo per la Bonifica, l'Irrigazione e il Territorio Rurale (SIBITER) della Regione Lombardia, l'unica opera di presa del Consorzio nel territorio di Ponte S. Pietro è costituita dal Canale Curnino e Ceresino, la cui derivazione dal fiume Brembo è situata a valle sia dei pozzi di presa sia dei pozzi di resa di Aruba, a distanze rispettivamente di 1,8 km e 1 km (Figura 23).

Come precedentemente illustrato (rif. Cap. 2), l'intero volume d'acqua prelevato dai pozzi di presa viene restituito in parte direttamente al fiume Brembo, tramite scarico di troppo pieno, e in parte reiniettato nella falda di subalveo a breve distanza dal fiume stesso e circa 1 km a monte dell'opera di presa del Consorzio. In questo modo, l'acqua torna nuovamente disponibile per il sistema fiume–falda, strettamente interconnesso, garantendo un bilancio complessivo in equilibrio, senza alcuna sottrazione significativa di risorsa idrica dal sistema stesso.

Tale conclusione è confermata anche dal bilancio di flusso elaborato con il modello matematico, che evidenzia come l'attivazione dei pompaggi alla portata massima di progetto (800 l/s) rispetto ad una condizione indisturbata (assenza di pompaggi e di reimmissione), comporti un incremento del drenaggio di acqua dal fiume Brembo verso la falda di subalveo nell'ordine di 0.5 m^3/s; la restituzione a valle delle acque emunte in falda tramite i pozzi di resa determina a sua volta un incremento di pari entità del flusso dalla falda verso il corso d'acqua che viene così alimentato. Ne consegue un impatto complessivo nullo sul bilancio idrico del tratto fluviale a monte delle opere di presa del consorzio.

Attraverso i risultati della modellazione matematica è possibile effettuare un bilancio idrico del fiume nelle diverse zone che lo costituiscono e che sono state precedentemente definite ai fini della modellazione. In particolare, come si osserva in Figura 24, la maggior parte del drenaggio avviene nelle zone 4-5-6 del fiume Brembo rappresentate in Figura 24 e Figura 23, mentre la restituzione a valle avviene nella zona 8 in corrispondenza dei pozzi di resa.

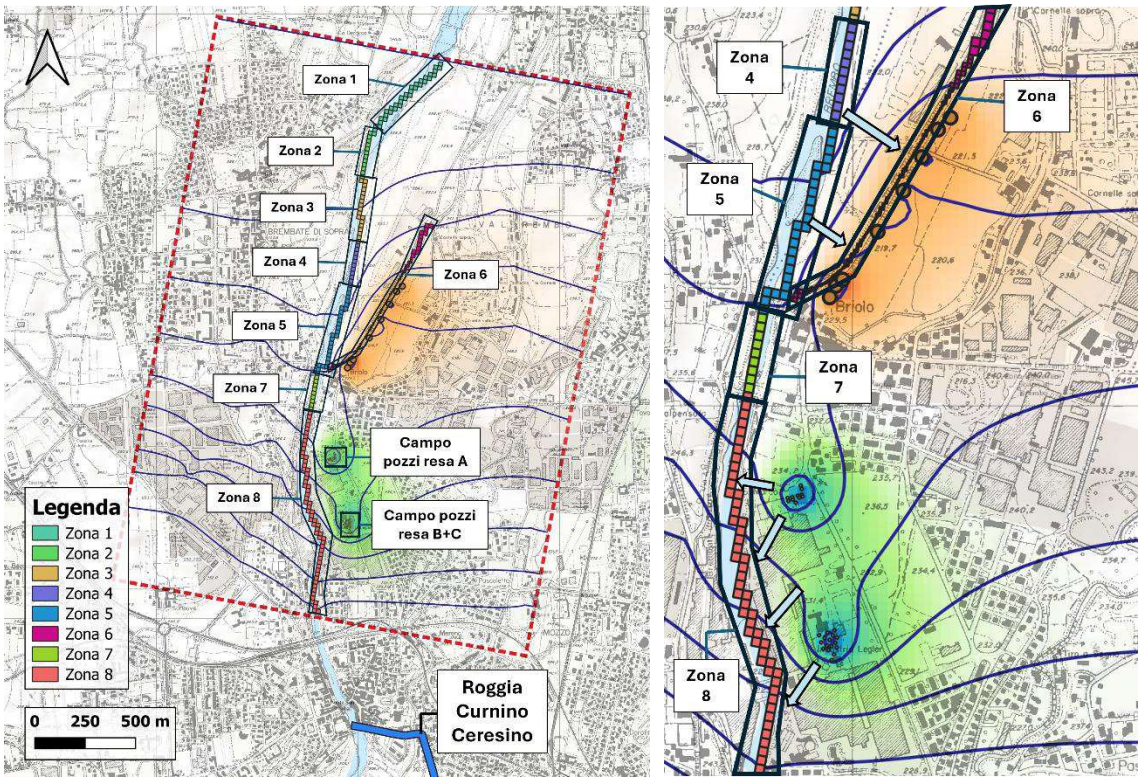


Figura 23 – Rappresentazione della suddivisione del fiume Brembo in zone nel modello matematico di flusso (a sinistra) e della dinamica di flusso (a destra) che si verifica in corrispondenza del campo pozzi di presa (drenaggio da zone 4-5-6) e dei campi pozzi di resa (ricarica verso zona 8). Il tracciato della roggia Curnino-Ceresino è tratto dal sistema informativo SIBITER della Regione Lombardia.

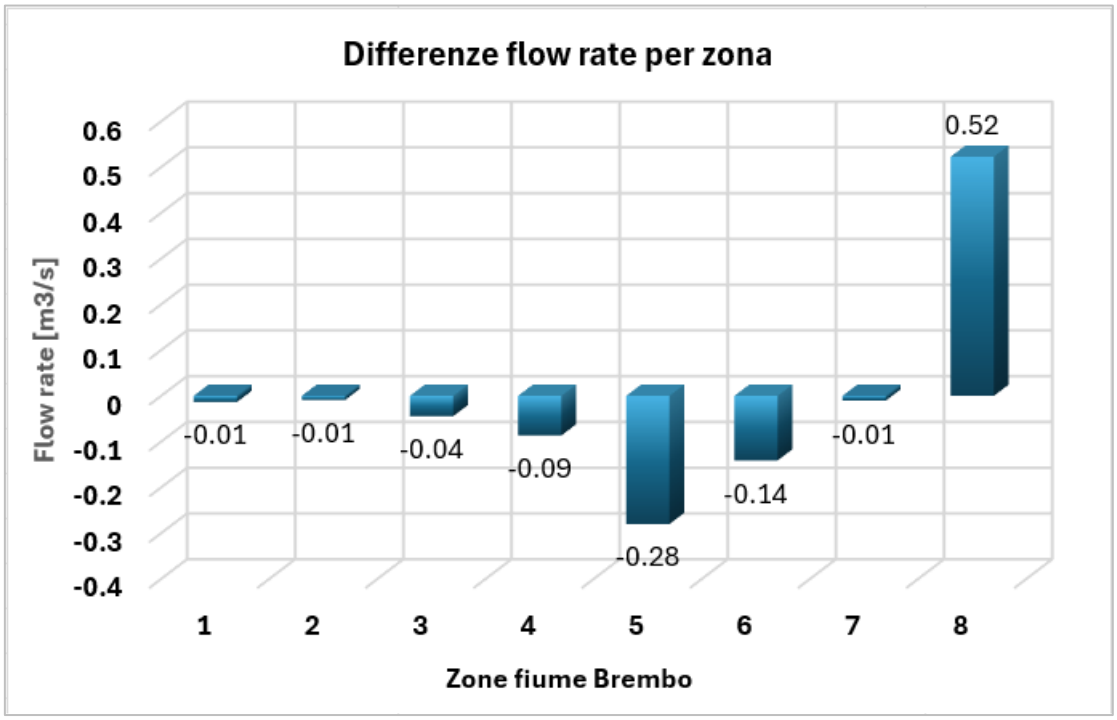


Figura 24 – Bilancio idrico del fiume Brembo risultante dal modello matematico di flusso. I valori negativi indicano i tratti in cui la falda drena acqua dal fiume, quelli positivi le situazioni in cui il fiume viene ricaricato dalla falda. Come si può notare il campo pozzi di presa influenza in particolare le zone 4-5-6 per una portata totale drenata di circa 0.50 m³/s. La medesima portata viene poi restituita più valle nella zona 8, in corrispondenza dei campi pozzi di resa.

Al fine di valutare il potenziale impatto del drenaggio del sistema fiume-falda influenzato dai pompaggi è stata presa in considerazione la serie storica delle portate del fiume Brembo misurate presso il Ponte di Briolo, Valbrembo. Come si osserva in Figura 25, le portate medie minime mensili per ogni anno dal 1970 al 2019 sono raramente inferiori ai 8-9 m³/s, e mai inferiori ai 5 m³/s. Tali portate sono comunque limitate ai brevi periodi temporali di magra, mentre le portate medie per ogni anno sono tipicamente comprese tra 25 m³/s e 50 m³/s.

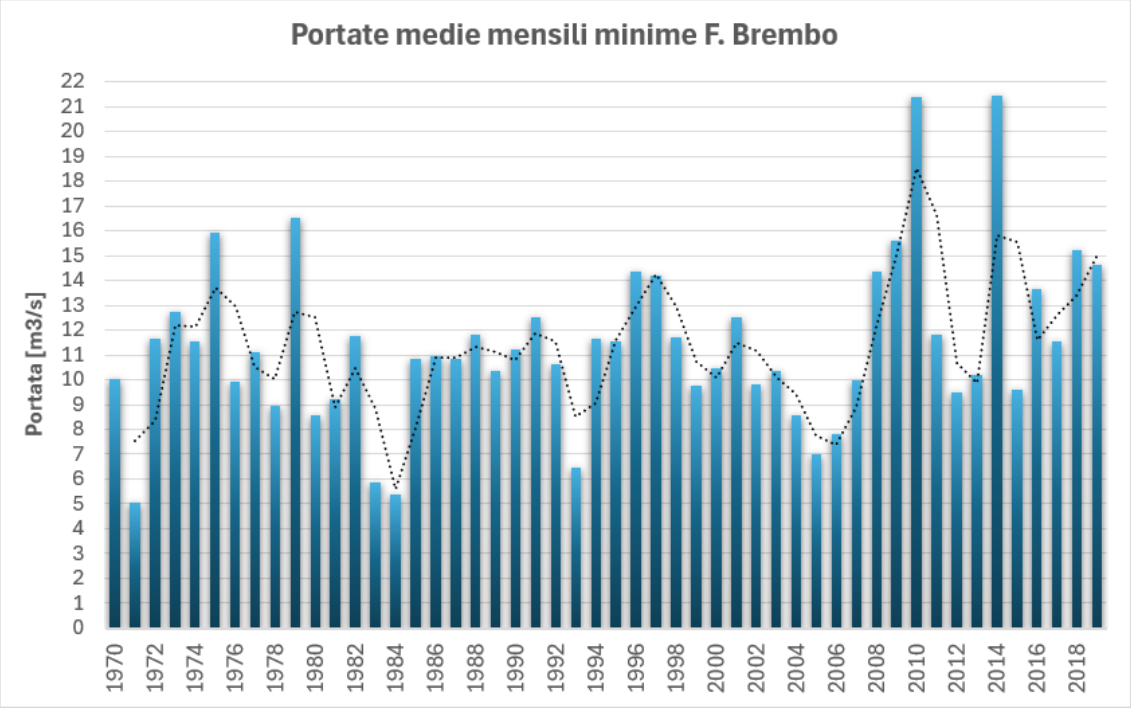


Figura 25 – Portate minime mensili registrate per ogni anno dal 1970 al 2019 presso il Ponte di Briolo, a Valbrembo.

Dal momento che la restituzione delle acque emunte nel fiume e nella falda di subalveo avviene a monte della derivazione del canale, ad una distanza di circa 1 km, e che la portata drenata del Brembo risulta essere solo una piccola parte della portata complessiva dello stesso, si esclude ogni possibile impatto in termini di depauperamento del corpo idrico superficiale.

7. CONCLUSIONI

La presente relazione è stata redatta in ottemperanza alle prescrizioni del MASE relative al progetto di ampliamento del polo tecnologico Aruba Spa nel comune di Ponte S. Pietro riguardanti gli aspetti legati all'impatto dei pozzi di pompaggio e reimmissione sulla falda acquifera e alla possibile interferenza con le opere di presa del Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca, alle portate di progetto autorizzate dalla Regione Lombardia tramite concessione, pari a 600 l/s (valore medio) e 800 l/s (valore massimo).

A seguito della realizzazione di quattro nuovi pozzi di pompaggio (P5, P6, P7, P8) e di una campagna integrativa di indagini (misure piezometriche e prove di pompaggio), finalizzata a una più precisa definizione della struttura idrogeologica e delle proprietà idrodinamiche locali dell'acquifero nonché delle interazioni tra falda e acque superficiali, è stato sviluppato un modello matematico di flusso aggiornato.

Il modello è stato utilizzato per eseguire simulazioni volte a valutare gli aspetti oggetto delle prescrizioni del MASE, alle portate di progetto previste.Il risultati del monitoraggio e delle simulazioni modellistiche evidenziano quanto segue.

Relativamente all'impatto dei pompaggi e della reimmissione sulla falda acquifera si osserva che:

- L'andamento dei livelli piezometrici degli ultimi cinque anni, monitorato in continuo tramite sensori installati nei pozzi, non mostra variazioni significative, risultando sostanzialmente stabile. Ciò evidenzia l'assenza di fenomeni di depauperamento della risorsa idrica sotterranea anche in presenza di un aumento delle portate di emungimento.
- Le simulazioni modellistiche, eseguite considerando le condizioni di minimo livello piezometrico registrate nel periodo 2022-2023, mostrano un impatto limitato sulla falda acquifera locale dei sistemi di pompaggio, sia alle portate medie di progetto (600 l/s) che massime (800 l/s). Gli abbassamenti massimi indotti sono dell'ordine di 2-3 m in corrispondenza dei pozzi di pompaggio e inferiori al metro nelle aree limitrofe, equivalenti al 5-10% dello spessore saturo dell'acquifero indicando un impatto contenuto sulla risorsa idrica sotterranea. Inoltre, i livelli si stabilizzano rapidamente nei primi giorni e rimangono costanti per l'intero periodo simulato (253 giorni), confermando l'assenza di fenomeni di depauperamento della risorsa idrica a lungo termine.
- Gli innalzamenti simulati nei pressi dei pozzi di resa sono coerenti con quelli osservati durante le prove di immissione eseguite in fase di collaudo. Considerando i valori di soggiacenza della falda indisturbata nell'area del datacenter (13-17 m da piano campagna) e il carattere localizzato degli innalzamenti, non si configurano condizioni di potenziale criticità o di attenzione.

Per quanto riguarda l'eventuale interferenza con le opere di presa del Consorzio di Bonifica si osserva che:

- L'unica opera di presa del Consorzio nel territorio di Ponte S. Pietro è costituita dal Canale Curnino e Ceresino, la cui derivazione dal fiume Brembo è situata a valle sia dei pozzi di presa sia dei pozzi di resa di Aruba, a distanze rispettivamente di 1,8 km e 1 km.
- L'intero volume d'acqua prelevato dai pozzi di presa viene restituito in parte direttamente al fiume Brembo, tramite scarico di troppo pieno, e in parte reimmesso nella falda di subalveo a breve distanza dal fiume stesso, circa 1 km a monte dell'opera

di presa del Consorzio. In questo modo, l'acqua torna nuovamente disponibile per il sistema fiume–falda, garantendo un bilancio complessivo in equilibrio, senza alcuna variazione significativa della risorsa idrica del sistema stesso.

- Tale risultato è confermato dal bilancio di flusso eseguito con il modello matematico, che mostra come l'attivazione dei pompaggi alla portata massima (800 l/s) comporta un incremento del drenaggio dal fiume Brembo verso la falda di subalveo nell'ordine di 0,5 m^3/s. La restituzione a valle delle acque in falda determina a sua volta un incremento equivalente dell'alimentazione del fiume da parte della falda, risultando quindi in un impatto complessivo nullo sul bilancio idrico a monte delle opere di presa del Consorzio.

Le valutazioni eseguite permettono pertanto di escludere impatti ed interferenze dei sistemi di pompaggio di Aruba con l'opera di presa del Consorzio.

ALLEGATO 1

PROVE DI POMPAGGIO A PORTATA COSTANTE

Per dettagliare i parametri idrodinamici dell'acquifero (trasmissività, permeabilità) sono state eseguite tra l'11 gennaio e il 3 febbraio 2023 prove di pompaggio di lunga durata (24-36 ore) sui pozzi n. 2, n. 4, n. 5, n. 6 e n. 8 al fine di determinare le caratteristiche idrodinamiche (trasmissività, conducibilità idraulica) dell'acquifero.

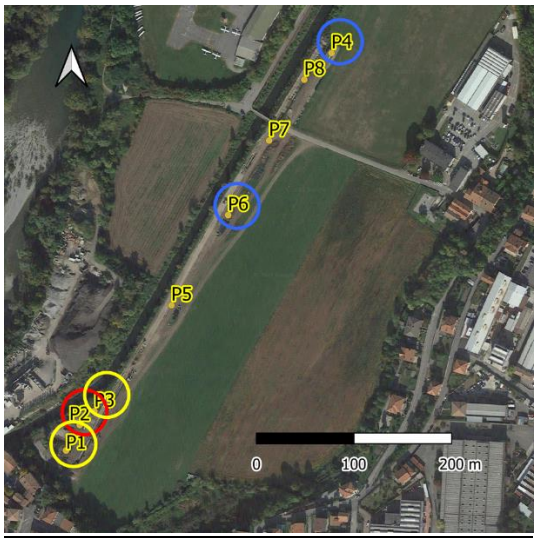
Le prove sono state eseguite attivando il pompaggio sul pozzo, determinata sulla base dei risultati delle prove a gradini, mantenendola al di sotto della portata critica ottenuta, e monitorando gli eventuali abbassamenti nei 2 pozzi adiacenti. Per evitare ogni disturbo, nel corso delle prove sono state mantenute costanti le portate degli altri pozzi del campo attivi.

Di seguito si riportano le modalità di esecuzione delle prove e la sintesi dei risultati ottenuti.

<u>POZZO 2</u>

La prova è stata eseguita dal 17 gennaio 2023 ad una portata di 62.5 l/s per una durata di circa 24 ore.

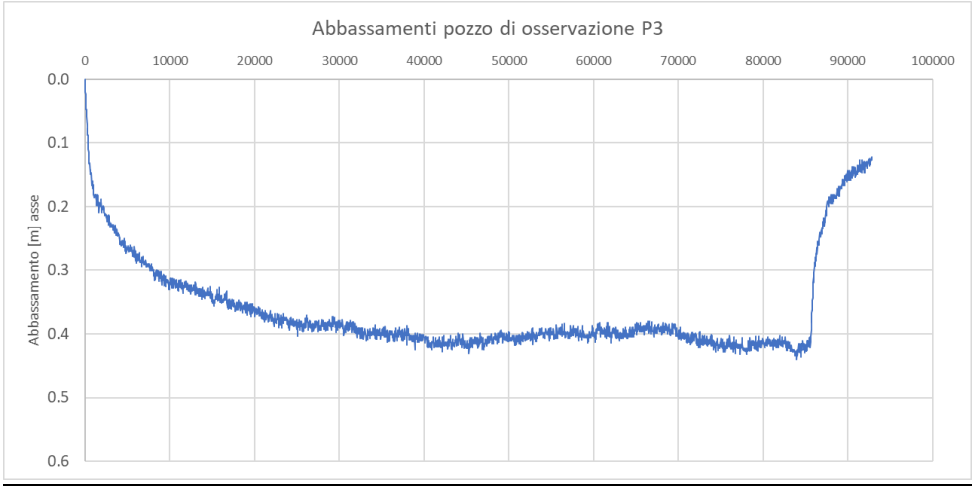
Nel corso della prova sono stati monitorati, tramite registrazione in continuo con datalogger (intervallo di misura ogni 30 secondi), i pozzi adiacenti P1 e P3 (in giallo nella figura seguente, in blu gli altri pozzi attivi).



Nella tabella seguente si riporta il dettaglio delle operazioni di pompaggio e dei monitoraggi eseguiti.

data/ora	attività
13/01/2023 13:00	Installazione datalogger su P1 e P3
16/01/2023 17:50	Spegnimento P2 e P1
17/01/2023 09:40	**Inizio pompaggio P2**
17/01/2023 10:22	Stabilizzazione portata a 62.5 l/s
18/01/2023 09:39	Inizio spegnimento P2
18/01/2023 09:44	**Fine pompaggio**

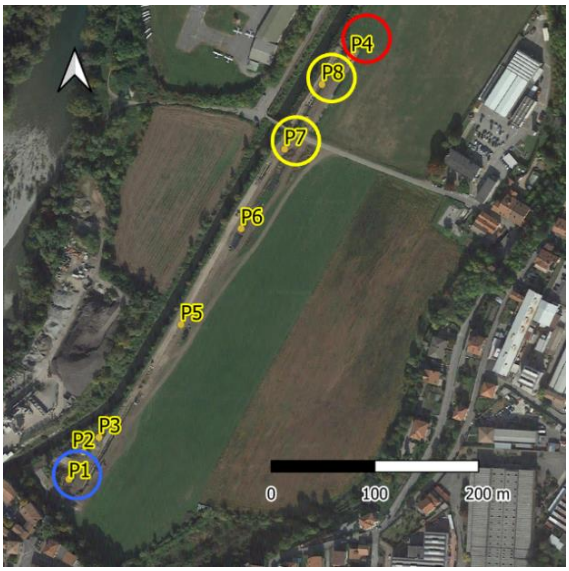
Nelle figure seguenti sono riportati gli abbassamenti registrati dopo l'avvio del pompaggio nei pozzi di osservazione P1 e P3. L'abbassamento osservato è nell'ordine di 0.5 m in P1 e 0.4 m in P3. L'interpretazione delle curve abbassamento/tempo con il metodo di Cooper-Jacob ha restituito un valore medio di Trasmissività di $8{,}7 \times 10^{-2}$ m^2/s, a cui corrisponde, considerando uno spessore saturo di 16 m, una conducibilità idraulica pari a $5{,}4 \times 10^{-3}$ m/s.



POZZO 4

La prova è stata eseguita dal 19 gennaio 2023, il pozzo, attivo, è stato spento il giorno precedente e successivamente riattivato e mantenuto attivo a portata costante di 100 l/s fino al 23 gennaio.

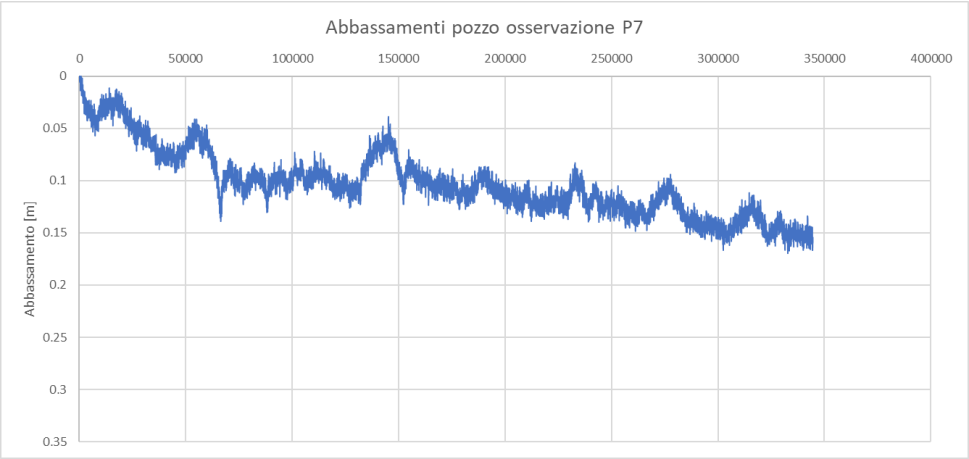
Nel corso della prova sono stati monitorati, tramite registrazione in continuo con datalogger (intervallo di misura ogni 30 secondi), i pozzi adiacenti P7 e P8 (in giallo nella figura seguente, in blu gli altri pozzi attivi).



Nella tabella seguente si riporta il dettaglio delle operazioni di pompaggio e dei monitoraggi eseguiti.

data/ora	attività
18/01/2023 12:10	Installazione datalogger su P7 e P8
18/01/2023 14:30	Spegnimento P4 (pre-spegnimento la portata oscillava tra 275 e 325 m^3/h)
19/01/2023 09:44	**Avvio pompaggio su P4**
19/01/2023 09:56	Stabilizzazione portata P4 a 100 l/s
23/01/2023 09:26	**Fine monitoraggio su P7 e P8**

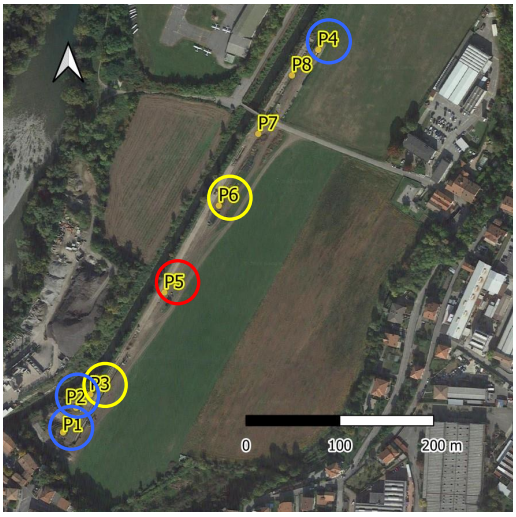
Nelle figure seguenti sono riportati gli abbassamenti registrati dopo l'avvio del pompaggio nei pozzi di osservazione P7 e P8. L'abbassamento osservato è nell'ordine di 0.3 m in P8 e 0.15 m in P7, più distante. L'interpretazione delle curve abbassamento/tempo con il metodo di Cooper-Jacob ha restituito un valore medio di Trasmissività di $2{,}8 \times 10^{-1}$ m^2/s, a cui corrisponde, considerando uno spessore saturo di 16 m, una conducibilità idraulica pari a $1{,}7 \times 10^{-2}$ m/s.



POZZO 5

La prova è stata eseguita dal 31 gennaio 2023 ad una portata di 72 l/s per 24 ore, nel corso dell'ultima ora di prova è stata incrementata la portata fino a 82 l/s al fine di confermare il raggiungimento della portata critica ottenuta dalle precedenti prove a gradini (circa 80 l/s).

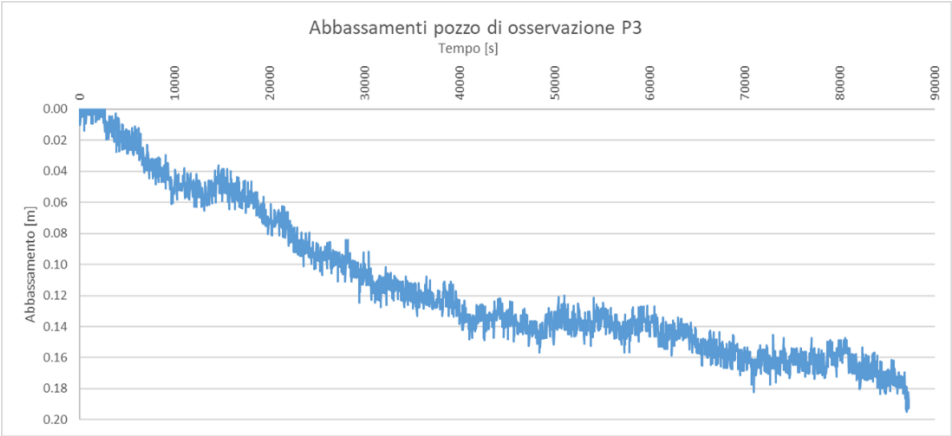
Nel corso della prova sono stati monitorati, tramite registrazione in continuo con datalogger (intervallo di misura ogni 30 secondi), i pozzi adiacenti P3 e P6 (in giallo nella figura seguente, in blu gli altri pozzi attivi).

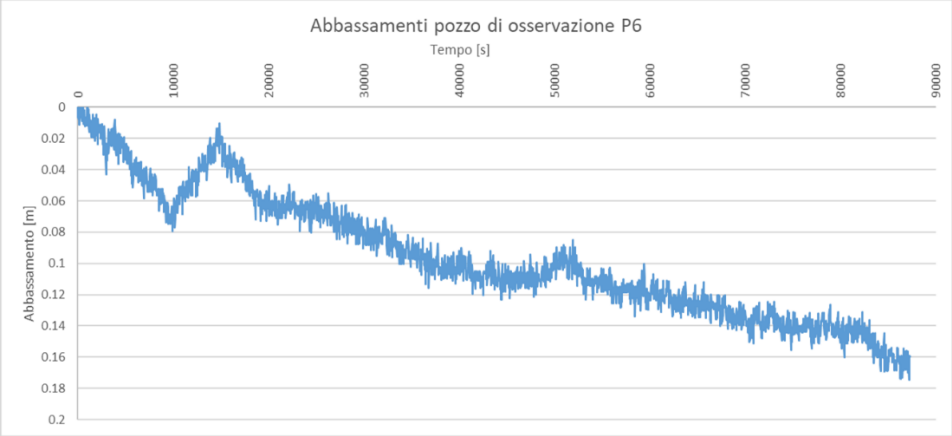


Nella tabella seguente si riporta il dettaglio delle operazioni di pompaggio e dei monitoraggi eseguiti.

data/ora	attività
31/01/2023 09:00	Installazione datalogger su pozzo osservazione P3
31/01/2023 09:12	Installazione datalogger su pozzo osservazioneP6
31/01/2023 11:26	**Avvio pompaggio su P5 (70 l/s)**
31/01/2023 12:00	Fermo pompa per riposizionamento tubo di scarico
31/01/2023 12:21	Riavvio pompaggio su P5 (70 l/s)
01/02/2023 09:45	Aumento portata P5 a 80 l/s
01/02/2023 10:30	Aumento portata P5 a 90 l/s
01/02/2023 11:41	**Spegnimento pompaggio su P5**

Nelle figure seguenti sono riportati gli abbassamenti registrati dopo l'avvio del pompaggio nei pozzi di osservazione P3 e P6. L'abbassamento osservato è nell'ordine di 0.18 m in P3 e 0.16 m in P6. L'interpretazione delle curve abbassamento/tempo con il metodo di Cooper-Jacob ha restituito un valore medio di Trasmissività di $9{,}2 \times 10^{-2}$ m^2/s, a cui corrisponde, considerando uno spessore saturo di 16 m, una conducibilità idraulica pari a $5{,}7 \times 10^{-3}$ m/s.

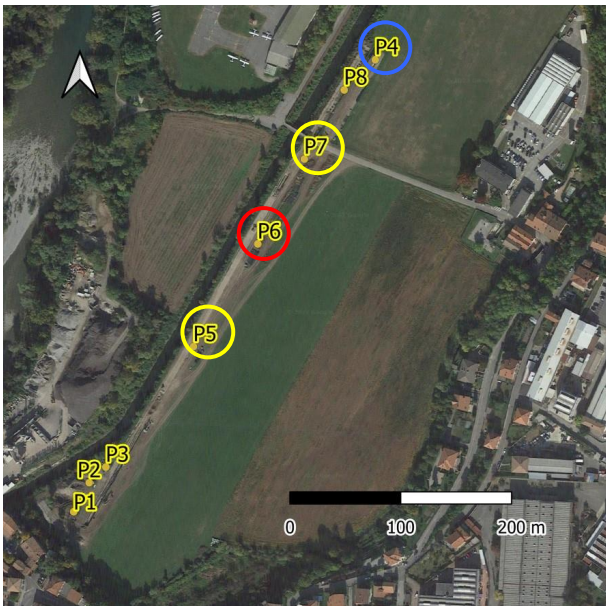




<u>POZZO 6</u>

La prova è stata eseguita dall'11 gennaio 2023 ad una costante di circa 100 l/s per una durata di circa 36 ore.

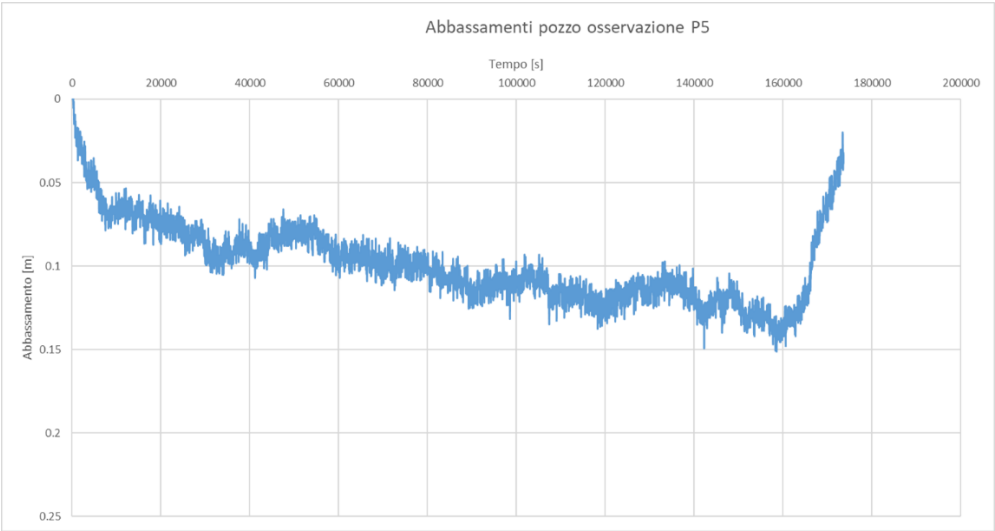
Nel corso della prova sono stati monitorati, tramite registrazione in continuo con datalogger (intervallo di misura ogni 30 secondi), i pozzi adiacenti P5 e P7 (in giallo nella figura seguente, in blu gli altri pozzi attivi).

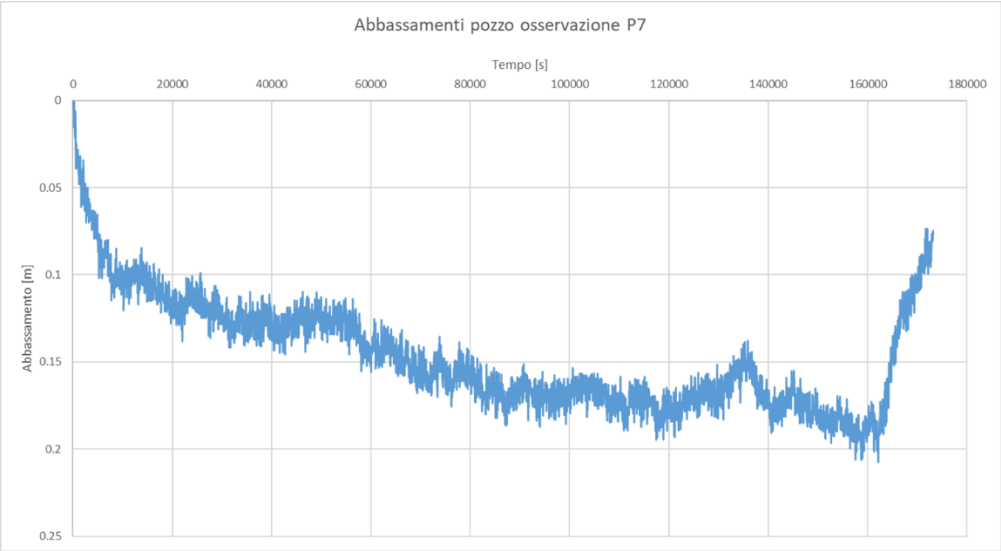


Nella tabella seguente si riporta il dettaglio delle operazioni di pompaggio e dei monitoraggi eseguiti.

data/ora	attività
11/01/2023 09:45	Installazione datalogger pozzo osservazione P7
11/01/2023 10:10	Installazione datalogger pozzo osservazione P5
11/01/2023 12:08	**Avvio Pozzo 6**
13/01/2023 09:47	**Spegnimento Pozzo 6**

Nelle figure seguenti sono riportati gli abbassamenti registrati dopo l'avvio del pompaggio nei pozzi di osservazione P5 e P7. L'abbassamento osservato è nell'ordine di 0.15 m in P5 e 0.2 m in P7. L'interpretazione delle curve abbassamento/tempo con il metodo di Cooper-Jacob ha restituito un valore medio di Trasmissività di $3{,}2 \times 10^{-1}$ m^2/s, a cui corrisponde, considerando uno spessore saturo di 16 m, una conducibilità idraulica pari a $1{,}9 \times 10^{-2}$ m/s.

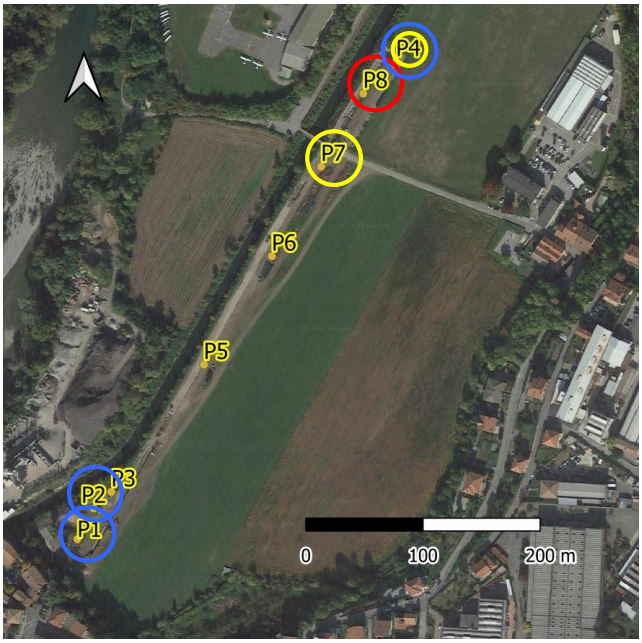




POZZO 8

La prova è stata eseguita dal 2 febbraio 2023 ad una portata di 61 l/s per circa 24 ore, nel corso delle ultime ore di prova è stata incrementata la portata prima fino a 72 l/s e successivamente fino a 82 l/s al fine di confermare il raggiungimento della portata critica ottenuta dalle precedenti prove a gradini (circa 80 l/s).

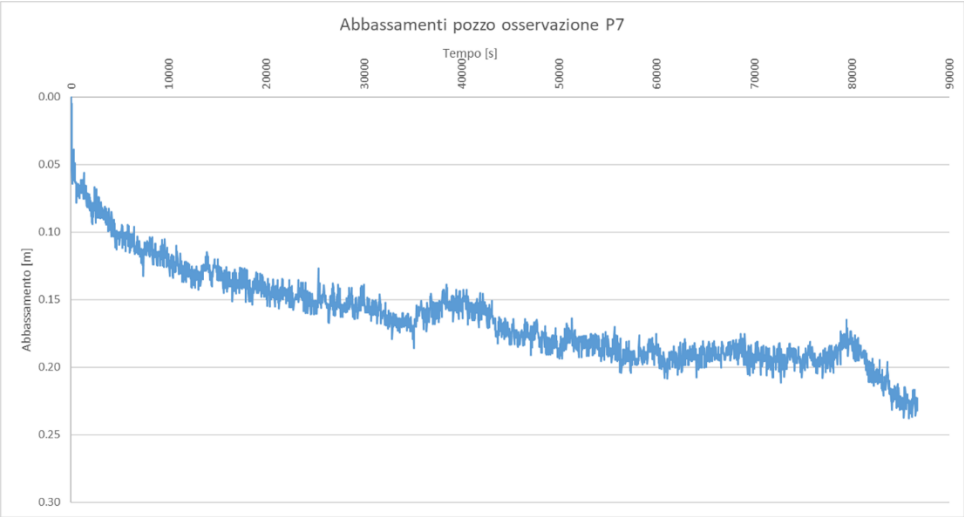
Nel corso della prova sono stati monitorati, tramite registrazione in continuo con datalogger (intervallo di misura ogni 30 secondi), i pozzi adiacenti P7 e P4 (in giallo nella figura seguente, in blu gli altri pozzi attivi).

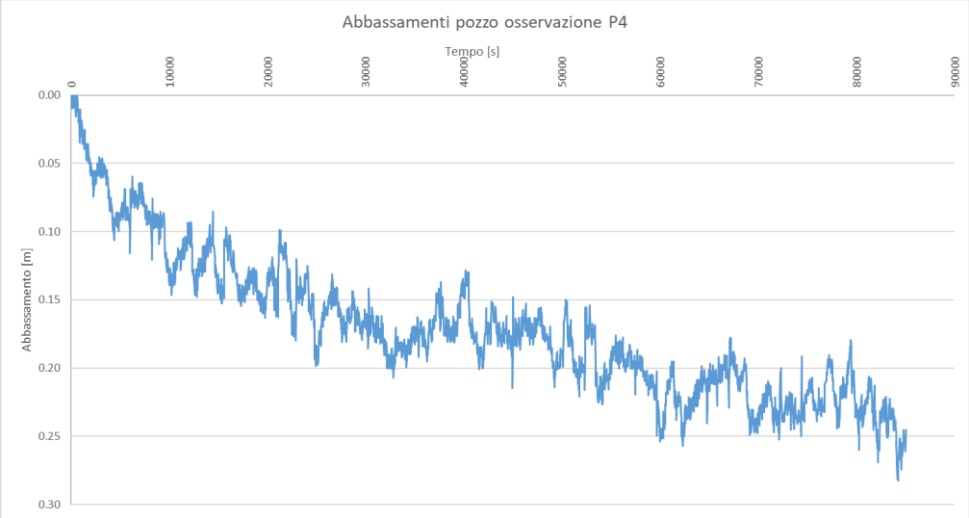


Nella tabella seguente si riporta il dettaglio delle operazioni di pompaggio e dei monitoraggi eseguiti.

data/ora	attività
01/02/2023 14:26	Installazione datalogger su pozzo osservazione P7
01/02/2023 14:38	Installazione datalogger su pozzo osservazione P4
02/02/2023 15:00	**Avvio pompaggio su P8 (61 l/s)**
03/02/2023 09:45	Aumento portata P8 a 72 l/s
03/02/2023 14:33	Aumento portata P8 a 82 l/s
03/02/2023 15:05	**Spegnimento pompaggio su P8**

Nelle figure seguenti sono riportati gli abbassamenti registrati dopo l'avvio del pompaggio nei pozzi di osservazione P7 e P4. L'abbassamento osservato è nell'ordine di 0.2-0.25 m in P7 e 0.25 m in P4. L'interpretazione delle curve abbassamento/tempo con il metodo di Cooper-Jacob ha restituito un valore medio di Trasmissività di $1,2 \times 10^{-1}$ m^2/s, a cui corrisponde, considerando uno spessore saturo di 16 m, una conducibilità idraulica pari a $7,3 \times 10^{-3}$ m/s.


Abbassamenti pozzo osservazione P7
Tempo [s]
0
10000
20000
30000
40000
50000
60000
70000
80000
90000
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
Abbassamento [m]


Abbassamenti pozzo osservazione P4
Tempo [s]
0
10000
20000
30000
40000
50000
60000
70000
80000
90000
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
Abbassamento [m]

Nella seguente tabella sono riassunti gli abbassamenti finali e le variazioni di temperatura registrate nel corso delle prove.

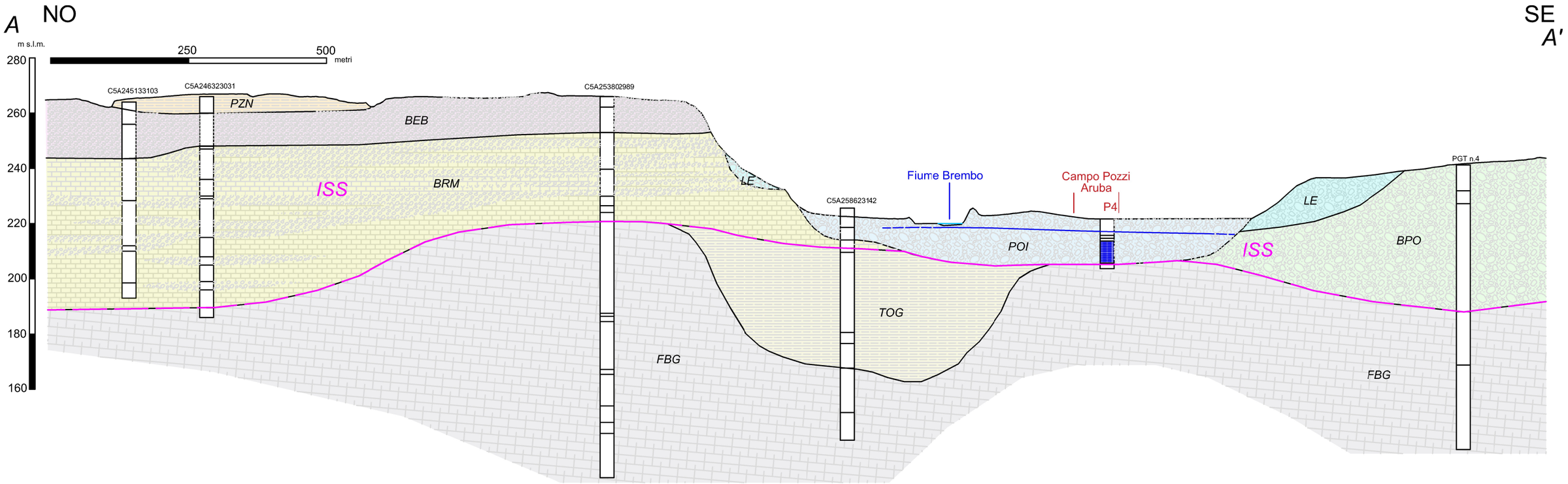
Prova	Pozzo	Portata [l/s]	Distanza [m]	Livello statico [m da b.p.]	Livello dinamico [m da b.p.]	Abbassamento [m]	T iniziale [°C]	T finale [°C]
P6	**P6**	100	0	5.34	6.55	1.21	13.2	12.7
	P5	0	109	5.61	5.74	0.13	10.4	10
	P7	0	86	5.64	5.82	0.18	13.9	13.9
P2	**P2**	70	0	5.29	7.1	1.81	9.9	10.7
	P1	0	29	4.91	5.42	0.51	11.1	11.7
	P3	0	20	5.24	5.66	0.42	9.8	9.8
P4	**P4**	100	0	5.44	7.78	2.34	12.4	12.7
	P8	0	39	5.21	5.51	0.3	13.7	13.4
	P7	0	110	5.67	5.82	0.15	13.9	13.1
P5	**P5**	67	0	5.96	7.23	1.27	9	8.6
	P5	80	0	5.96	7.64	1.68	9	8.6
	P5	90	0	5.96	9.04	3.08	9	8.9
	P3	0	135	5.93	6.13	0.2	9.7	9.5
	P6	0	107	5.66	5.82	0.16	12.1	12.2
P8	**P8**	61	0	5.65	7.67	2.02	13.3	12.1
	P8	72	0	5.65	8.57	2.92	13.3	12.1
	P8	82	0	5.65	9.46	3.81	13.3	12.1
	P4	78	39	7.34	7.58	0.24	12.8	12.6
	P7	0	72	5.96	6.2	0.24	12.5	12.1

Nella seguente tabella sono riassunti i valori di trasmissività e conducibilità idraulica ottenuti dalle prove.

POZZO	TRASMISSIVITA' [m2/s]	CONDUCIBILITA' IDRAULICA [m/s]
P2	$8,7x10^{-2}$	$5,4x10^{-3}$
P4	$2,8x10^{-1}$	$1,7x10^{-2}$
P5	$9,2x10^{-2}$	$5,7x10^{-3}$
P6	$3,2x10^{-1}$	$1,9x10^{-2}$
P8	$1,2x10^{-1}$	$7,3x10^{-3}$

ALLEGATO 2

SEZIONE IDROGEOLOGICA



Ghiaie e ciottoli in matrice sabbiosa
SINTEMA DEL PO (POI)
(Pleistocene sup.-Olocene)

Ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa
SUPERSINTEMA DI LENNA (LE)
(Pleistocene sup.)

Ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa
SUPERSINTEMA DI BESNATE - UNITA' DI PONTE S.PIETRO (BPO)
(Pleistocene medio-sup.)

Argille e limi
SUPERSINTEMA DI PALAZZAGO - UNITA' DI ARZENATE (PZN)
(Pleistocene inf.-sup.)

Ghiaie in matrice argillosa e conglomerati
SINTEMA DI BREMBATE (BEB)
(Pleistocene medio)

Conglomerati
CEPPO DEL BREMBO (BRM)
(Pleistocene inf.)

Argille grigio-verdi
FORMAZIONE DI TORNAGO (TOG)
(Pliocene sup.)

Alternanza di calcari marnosi e argilliti
FLYSCH DI BERGAMO (FBG)
(Campaniano)

Base Idrostruttura Superficiale (ISS)

Livello piezometrico 14/12/2022